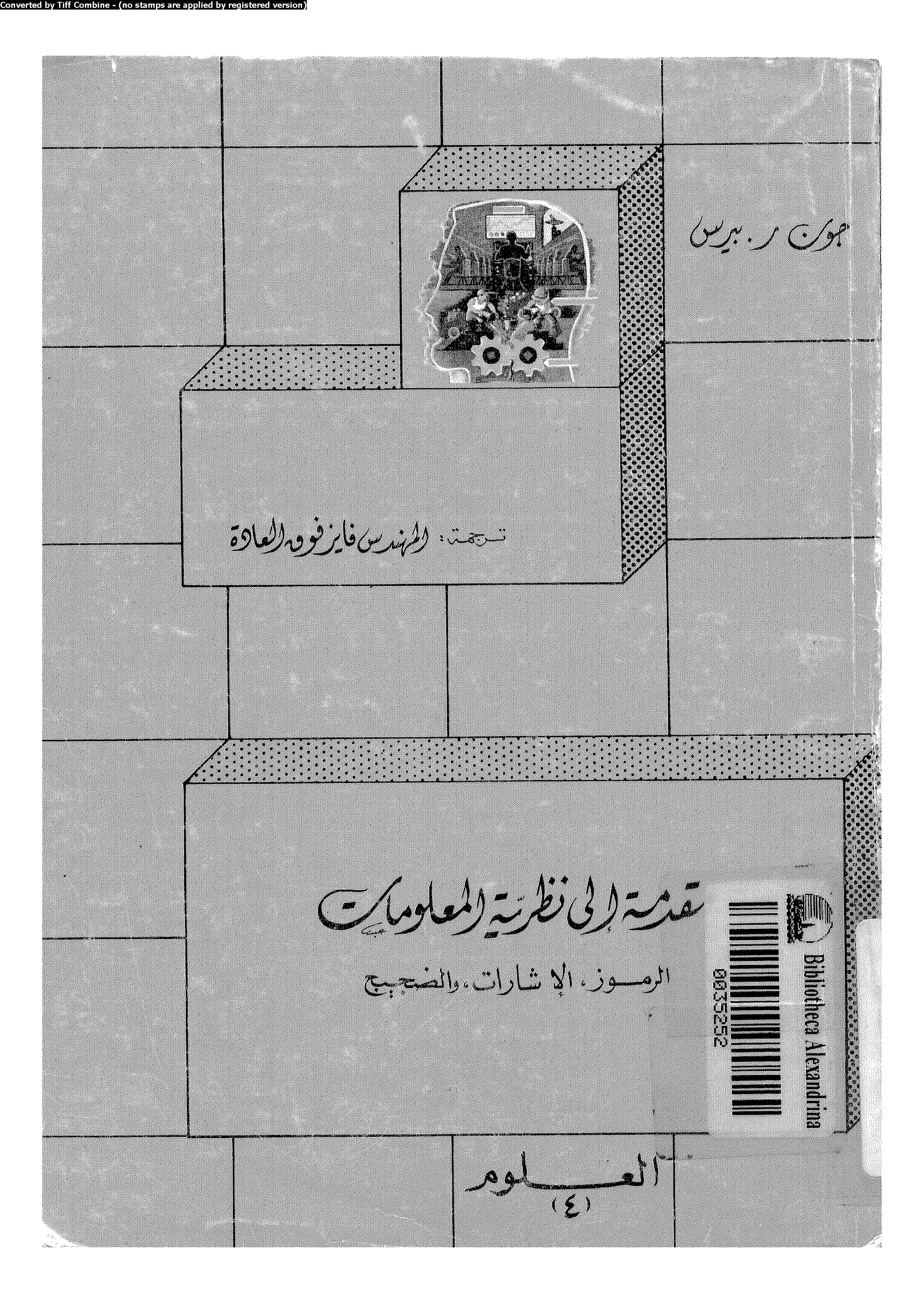

جون ر. بيرس
ترجمة: المهندس فايز فوق العادة
مقدمة إلى نظرية المعلومات
الرموز، الإشارات، والضجيج
Bibliotheca Alexandrina
0035252
العلوم
(٤)

الاشراف الفني : زهـــير الحــمو

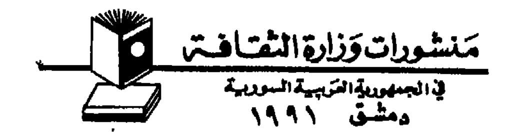
مقدمة إلى نظرية المعلومات

جون ر. بيرس

مقدمة إلى نظرية المعلومات

الرموز، الإشارات، والضجيج

ترجمة:
المهندس فايز فوق العادة



AN INTRODUCTION TO INFORMATION THEORY

Symbols, Signals & Noise

JOHN R. PIERCE
Professor of Engineering
California Institute of Technology

Second, Revised Edition

مقدمة الى نظرية المعلومات = An Introduction to Information theory : الرموز ، الاشارات والضجيج / تأليف جون . ر. بيرس ، ترجمة فايز فوق العادة . ـ دمشق : وزارة الثقافة ، ١٩٩٠ ـ ٣٦٨ ص : موضح ، ٢٤ سم ـ (علوم ، ٤) .

١ ـ ٥٣ر١ ٠١٠ ب ي ر م ٢ ـ العنوان ٣ ـ بيرس ٤ ـ فوق العاده
٥ ـ السلسلة .

مكتبة الاسد

الايداع القانوني ع ـ ٣٩٩ / ٥ / ١٩٩٠

إهداء المؤلف

إلى كلود

وبيتي شانون



مقدمة المؤلف

ان اعادة نشر هذا الكتاب اتاح لي الفرصة لتصحيح كتاب سابق كنت قد الفته منذ حوالي عشرين سنة بعنوان : الرموز ، الاشارات والضجيج ، واعادة النظر فيه بحيث يصبح متمشيا مع الوضع الراهن من التطور . ونظرا لان الكتاب يتعلق بعمل شانون بشكل رئيسي ، والذي سيبقى خالدا الى الابد ، فان اعادة النظر في مؤلفي السابق لم يترتب عليها اجراء الكثير من التغييرات ، ففي بعض الاماكن غيرت التواريخ الخاصة ببعض العلماء الذين توفوا ، الا انني لم احاول استبدال مصطلح هزة في الثانية (هـ/ثا) بالمصطلح الاحدث هرتز/ثانية (هر / ثا) وكذا لم ابدل في كل المواقع مصطلح شانون : نظرية الاتصالات بالمصطلح الاحدث الذي استخدمه اليوم : نظرية المعلومات .

لقد قمت بتغيير بعض الاشياء ، كاعادة كتابة بعض الفقرات وحوالي عشرين صفحة دون تغيير في ترقيم الصفحات .

ففي الفصل العاشر : نظرية المعلومات والفيزياء ، قمت بتغيير درجة حرارة خلفية الكون من (درجتين كلفين الى اربع درجات) وفق كتابي السابق (لا اعلم من اين اتيت بهذا التقدير في حينه) ، الى القيمة الصحيحة ٥ر٣ كلفين ، كما حددها بنزايس وويلسون . واستنادا لحقيقة انه في غياب الضجيج يمكننا ان نبث عدد لا حصر له من واحدات البيت في كل واحدة كم ، فقد اضفت مادة جديدة عن التاثيرات الكمية في الاتصالات . كما قمت باستبدال مثال قديم عن الاتصال الفضائي بتحليل مختصر للبث الميكروي لاشارات الصور من مركبة فويجير بقرب المشتري ، كذلك عرضت احتمالات جديدة .

اما في الفصل السابع المعنون ((الترميز الفعال)) فقد اعدت كتابة بعض الصفحات المتعلقة بالترميز الفعال لمصادر التلفزة وغيرت بعض الفقرات الخاصة بتعديل الترميز النبضي ومرمزات الاصوات . كذلك غيرت في المادة المتعلقة ببحث تصحيح الاخطاء بواسطة الترميز .

وفي الفصل الحادي عشر ، فصل السيبرنيتيك ، اعدت كتابة اربع صفحات عن الحاسبات الالكترونية والبرمجة والتي تقدمت بشكل يفوق التصور خلال العشرين سنة الماضية .

وأخيراً فقد اجريت بعض التغييرات الطفيفة في الفصل السادس عشر القصير والاخير : عودة الى نظرية الاتصالات .

وعلى خلفية هذه التغييرات الفت نظر القارىء الى سلسلة من الابحاث في تاريخ نظرية المعلومات نشرت في دوريات علمية بعنوان محاضر عن نظرية المعلومات وكذلك الى كتابين هامين يتحدثان بتفصيل اكبر عن الوضع الراهن لنظرية المعلومات والجوانب الرياضية للاتصالات هما : نظرية المعلومات والترميز لمؤلفه روبرت ماك اليس ، ومبادىء الاتصالات الرقمية والترميز لمؤلفه اندريه فيتربي .

ان عدداً من فصول الكتاب الاصلي تتعلق بمواضيع لا تبرز أهميتها الا من خلال تطبيق او محاولة تطبيق نظرية المعلومات .

أعتقد ان الفصل الثاني عشر : نظرية المعلومات وعلم النفس يعطي فكرة معقولة عن نوع التطبيقات الجارية في ذلك المجال . لقد اصبح علماء النفس المعاصرون اقل اهتماما بنظرية المعلومات بالمقارنة مع علم الادراك ، لافكار مستمدة من علم اصل الانسان واللغويات ، كما يستند الى اعتقاد جازم بان نظاما رياضيا بسيطا وفعالا يكمن في خلفية الوظائف الانسانية . يذكرني علم الادراك المعاصر بعلم السيبر نيتيك قبل عشرين سنة . اما فيما يتعلق بنظرية المعلومات والفن ، فقد حل الكومبيوتر اليوم محل نظرية المعلومات بشكل جزئي ، الا ان المعلومات المتناولة في الفصل

الثالث عشر قد تم تعميقها . ساستعرض بعض الاشعار الجذابة التي انتجتها ماري بوروف ، وفماعرج على الاخص على بعض قواعد الاغاني الشعبية السويدية التي استطاع يوهان ساندبيرغ بواسطتها انتاج عدد من الالحان الاصيلة الجميلة .

يعود ذلك بنا الى اللغة والفصل السادس : اللغة والمعنى . لقد طرح ذلك الفصل مجموعة من المشاكل لم تحل خلال العشرين سنة الماضية . اننا لا نملك جملة كاملة من القواعد لاي لغة طبيعية ، في حين ان القواعد الحرفية والشكلية اثبتت فعاليتها وبشكل ناجع في لغات الكومبيوتر . لقد تحول الاهتمام في مجال اللغويات ، وفق ما ارى ، الى اعتبارات التصويت في اللغة المنطوقة ، ما هي اهم التراكيب الصوتية وكيف تتفاعل مع بعضها ، ولعل هذه الابحاث من الاهمية بمكان في مجال الكومبيوتر ، اذ يمكن بواسطتها استنتاج الطرق الكفيلة بجعل الكومبيوتر ينطق نصا مكتوبا في ذاكرته . لقد كتب شومسكي وهال كتابا واسعا عن النبرات ، وتناول الموضوع ليبرمان وبرنس في تقرير متكامل مختصر .

هذا هو كل ما يتعلق بالتغييرات التي اجريتها على الكتاب الاصلي : الرموز ، الاشارات ، والضجيج ، وعدا ذلك اعود لاكرر بعض ما ذكرته في مقدمة ذلك الكتاب .

لقد سررت فعلا عندما اقترح ر. نيومان ان اقوم بتاليف كتاب عن الاتصالات ، وكان ملهمي في عملي التكنيكي هذا الجانب او ذاك من موضوع الاتصالات . وفعلا شعرت ان من واجبي ان انقل الى القراء ماهو اكثر امتاعا وامتناعا من هذا الموضوع . لم يكن تحقيق هذا الهدف امرا سهلا ، سيما قبل عام ١٩٤٨ ، حين اصدر كلود شانون كتابه : (نظرية رياضية للاتصالات) . لقد جمعت نظرية شانون في الاتصالات ، والتي عرفت فيما بعد بنظرية المعلومات ، وفي بوتقة واحدة ، كل المشاكل التي كانت قد ارقت مهندسي الاتصالات لسنوات نعم ، كان بامكان هذه النظرية ان تخلق نظاما جديدا محددا وواضحا وان تحله محل جملة

سابقة من المسائل الخاصة والافكار المشتتة والتي كان الارتباط بينها غامضاً وغير مفهوم • ولا يستطيع احد اتهامي بانني من اتباع شانون ، دون نيله مكافاة فعلية لقاء ذلك الاتهام •

وهكذا تملكتني قناعة كاملة بان تقريري عن الاتصالات يجب ان يعكس وبشكل امين نظرية المعلومات كما صاغها شانون • وكان على تقريري ان يكون اوسع من عمل شانون بتبيانه مدى ارتباط النشاطات الفكرية الانسانية المختلفة بنظرية المعلومات ، وكذلك ان يكون اعرض بابتعاده ما امكن عن الزي الرياضي المحض •

هنا برز التناقض • ان تقريري يجب ان يكون اقل رياضية من تقرير شانون ، الا انه ليس بامكانه ان يكون غير رياضي البتة ، فنظرية المعلومات هي نظرية رياضية تنطلق من فرضيات معينة تصف جوانب من الاتصالات التي ستتعرض اليها ، وتصوغ باستخدام هذه الفرضيات استنتاجات منطقية منوعة • تتجلى عظمة نظرية المعلومات في نظريات رياضية محددة غاية في الاهمية ومدهشة .وما اشبه الحديث عن نظرية المعلومات دون الاقتراب من جهازها الرياضي بالحديث عن مؤلف موسيقي عظيم دون اسماع الاخرين بعضاً من اعماله •

كيف تسنى لي ان اتحرك الى هدفي ؟ بدا ان الكتاب يجب ان يكون محتوى في ذاته ، اي يجب ان يحقق فهم الرياضيات التي ينطوي عليها دون العودة الى مراجع اخرى او تذكر بعض مضامين كتب الرياضيات المدرسية ، ككتب المرحلة الثانوية مثلا • هل يعني ذلك امتناعي عن ذكر اي علاقة رياضية ، كلا بالطبع ، بل يعني ان اعرض الجوانب الرياضية ببساطة وبلغة اولية • لقد فعلت ذلك في متن الكتاب وفي الملحق عند نهاية وباختصار يستطيع اي قارىء غير متمرس بالرياضيات ان يحل اي اشكال بينه وبين الكتاب بمجرد التنقل بين المتن والملحق •

ماهي حدود الصعوبة التي كان عليّ الاّ اتجاوزها ، كان عليّ ان احدد بشكل مسبق اعقد علاقة رياضية ساتعرض لها ، وهذا يعني تجاوز

بعض النقاط الهامة ، ومهما يكن من امر ، فقد بقي مؤلفي اسهل بدرجة كبيرة من الاقسام الصعبة من كتاب « عالم الرياضيات » لمؤلفه نيومان . اما حيث تبلغ المعالجة مدى متقدماً من التعقيد فقد آثرت عرض الخطوط العامة للرياضيات على تفصيل مضمونها .

على كل حال ، يتضمن هذا الكتاب بعض المقاطع الصعبة لغير الملم بالرياضيات ، وانصح القارىء في هذه الحالة بتجاوز تلك المقاطع مكتفياً بنتائجها وحسب . وسيعرف كل القراء حين بلوغ نهاية الكتاب ان ايراد المقاطع الصعبة كان امراً لا مفر منه ، ولعل فهم تلك المقاطع سيكون اكثر يسراً في القراءة الثانية للكتاب . ولو انني لم اضمن كتابي تلك المقاطع لما تمكن القارىء من بلوغ المستوى من فهم الموضوع الذي سيحققه بعد دراسة الكتاب . اما المؤلفات الاخرى في نظرية المعلومات فهي في حدود معرفتي إما غاية في البساطة وإما صعبة لدرجة ان القارىء الجاد وغير الخبير لن يستطيع اجتياز الأقسام السهلة المقابلة للاقسام السهلة من كتابي . اجد من واجبي ان اذكر ان بعض المؤلفات الأخرى في نظرية المعلومات مربكة بحق او هي خاطئة تماماً .

سيبرز ولا شك ، في هذه المرحلة ، تساؤل هام لدى القارىء ، عما اذا كانت نظرية المعلومات تستحق منه او من المؤلف كل هذا العناء . وكل ما استطيع قوله في هذا السياق هو ان نظرية المعلومات تساوي في الاهمية العلم والتكنولوجيا ، لأن نظرية المعلومات جزء من عالم العلم والتكنولوجيا . ولعلها مهمة القارىء ان يحاول تكوين صورة مفهومة عن الموضوع والى الحد الذي يريد ، اذا كانت لديه رغبة اكيدة بسبر عالم المعرفة والتكنولوجيا . ان صورة نظرية المعلومات يجب الاّ تبدو غريبة وغير مفهومة كما ان ادراكها يجب الاّ يكون سهلاً ودون توظيف ما يلزم من الجهد .

لم يكن تاليف هذا الكتاب امراً يسيراً ، وربما تعذر إنجازه لولا سابقة مؤلف كلود شانون . لقد ساهم كلود شانون مساهمة كبيرة في اخراج

الكتاب بقراءته وفي إسداء النصح حول ما يتعلق بضرورة اجـراء بعض التغييرات فيه ، امـا دافيد سليبيان فقد اخرجني عـن مسارب الخطا بشكل حاسم في حين نبهني اي ·، ن · جيلبرت الى الغلط في اكثر مـن مناسبة · راجـع ميلتون بابيت الفصل الخاص بنظرية المعلومات والفن مطمئناً اياي بشانـه ومقترحاً بعض التغييرات ، وفي مجال علم النفس افدت من مشورة كل من ب · د · بريكر ، هـ · م · جينكنز ، و ن· ن· شيبارد ، وان كانت الآراء المثبتة في النهاية غير صادرة عنهم · لقد كانت مساعدة م · ف · ماثيوز كبيرة ، بينما قدم بنيوت ماندلبروت الدعم في كتابة الفصل الثاني عشـر ، وقـام بقراءة المخطوطة ج · ب · رانيون ، وكشف عن الاخطاء الانشائية إريك وولمان مزوداً ما يلزم من التوجيه · كما انني ادين للبروفسور مارتن هارويت الذي اقنعني واقنع دار نشر دوفر بضرورة إعادة طبع الكتاب · ويدين القارئ بدوره لجيمس · ر· نيومان لحقيقة إيرادي خلاصات في نهايات الفصول ، ولمحاولاتي اخـيراً تبسيط بعض النقاط وجعلها اسهل · انني ادين لكل هؤلاء ، ولا ادين باقل للآنسة ف· م· كوستللو التي استطاعت أن تعيد النظام الى فوضى المخطوطة حيث اعدتها واصلحتها باشكالها · اما بخصوص هذه الطبعة الجديدة فادين بالكثير لسكرتيرتي السيدة باتريشيا · ج· نيل ·

ايلول ١٩٧٩ ج· ر· بيرس

الفصل الأول

العالم والنظريات

نشر كلود . اي . شانون عام ١٩٤٨ بحثاً بعنوان (نظرية رياضية للاتصالات) وتحول البحث إلى كتاب عام ١٩٤٩ . اما قبل ذلك التاريخ فقد اقتصر الامـر على بعض البحاثة المتفرقين يحققون بعض الانجازات المنعزلة في نظرية الاتصالات بين الفينة والأخرى . والآن وبعد حوالي ثلاثين سنة ، اصبحت نظرية الاتصالات ، أو كما تدعى في بعض الأحيان نظرية المعلومات ، مجالاً للبحث معترفاً به . لقد نشر العديد من الكتب حول نظرية الاتصالات وعقدت حولها الندوات والمؤتمرات الدولية .

عيّـن معهـد المهندسين الكهربائيين والالكترونيين مجموعـة عمـل متخصصة في نظرية المعلومات تنشر دراستها بشكل دوري ستة مرات في السنة . كما تنقل مجلات أخرى مقالات متفرقة عن نظرية المعلومات .

نحن جميعاً نستخدم كلمتي الاتصالات والمعلومات ، ومن غير المحتمل أن نقلل من اهميتها . لقد عقب فيلسـوف معاصر هو آ. ج. آير على الاهمية القصوى والمعنى الواسع للاتصالات في حياتنا ؛ فوفق رأيـه ، لا نقصر مبادلاتنا على المعلومات فقط ، بل نتعداها الى المعرفة ، الخطأ ، الآراء ، الافكار ، الخبرات ، الآمال ؛ الأوامر ، الانفعالات ، العواطف والطباع . ان الحرارة والحركة كليهما يمكن نقلهما ، وكذا القوة ، الضعف والمرض . وينـوه الفيلسوف بأمثلـة وتعليقات اخرى عـن التظاهرات العريضة والملغزة للاتصال في عالم الانسـان .

وهكذا فالاتصالات بالغة الاهمية ومتنوعة ، ولذا تبرز أهمية نظرية عامة عن الاتصالات ، نظرية متماسكة ومفيدة . أما اذا اضفنا الى كلمة « نظرية » كلمة « رياضية » بكل ما تنطوي عليه من سحر وصرامة ، اذن لاستحالت مقاومة الإغراء ولو تعلمنا بعض العلاقات لحللنا كل مشاكلنا في الاتصالات ولاصبحنا سادة المعلومات عوضاً عن أن نكون عبيد المعلومات الخاطئة .

ولكن للأسف ليس هذا هو مسار العلم ، فمنذ ٢٣٠٠ سنة تناول فيلسوف آخر هو ارسطو في بحثه عن الفيزياء مفهوماً عاماً كالاتصالات هو مفهوم الحركة .

عرّف ارسطو الحركة بانها تحقيق ما هو كامن اذا كان موجوداً فعلا بشكل كامن ، وضمّن في مفهوم الحركة الزيادة والنقص لكل ما يمكن أن يزيد أو ينقص ، وأن يقترب او يبتعد ، واخيراً ما يمكن بناؤه . تحدث ارسطو عن ثلاثة اصناف من الحركة وذلك وفق شدتها ، تأثيرها ومكانها . لقد وجد فعلا ، كما قال ، أنواعاً عديدة من الحركة تساوي بمجموعها عدد المعاني المختلفة لكلمة : يكون .

نواجه الحركة هنا بكل تعقيداتها الجلية ، تلك التعقيدات التي تبدو مربكة لنا فعلا ، لأن ارتباط الكلمات ببعضها يختلف من لغة لأخرى ، وعلى كل حال لن نعني بالحركة كل التغييرات التي تحدّث عنها أرسطو بالضرورة .

لكم كان أمر الحركة هذه محيراً لاتباع ارسطو ! لقد بقي الامر كذلك حتى جاء نيوتن الذي عبر عن الحركة في قوانين علمية محكمة لا يزال المهندسون يستعملونها حتى اليوم في تصميم وبناء الآلات كما يطبقها الفلكيون في دراسة حركات الكواكب والنجوم والتوابع الصنعية . وقد وجد الفيزيائيون بعد ذلك ان قوانين نيوتن ليس الا حالات خاصة من قوانين اشمل ، وأن قوانين نيوتن هذه صحيحة اذا كانت المسرع المدروسة صغيرة بالمقارنة مع سرعة الضوء واذا كان مجال تطبيق الظاهرة

كبيراً بالمقارنة مع الذرة ، وعلى الرغم من ذلك تشكل قوانين نيوتن جزءاً حياً وفاعلاً من عالمنا الفيزيائي المعاصر ؛ اذ لم يضعها التطور المعاصر في المتاحف . واذا كانت الحركة جزءاً هاماً من عالمنا،وجب علينا استعراض قوانين نيوتن فيما يلي :

١ ـ يبقى اي جسم على حالته من السكون أو الحركة المنتظمة ما لم تؤثر عليه قوة ما .

٢ ـ يكون التغير في سرعة الجسم في اتجاه القوة المؤثرة عليه ، اما مقدار التغير فيتناسب طرداً مع القوه المؤثرة ومع الزمن الذي جرى خلاله التاثير ، واخيراً يتناسب مقدار التغير عكساً مع كتلة الجسم .

٣ ـ عندما يؤثر جسم ما بقوة على جسم آخر ، فان الجسم الآخر بدوره يؤثر على الاول بقوة تعاكس القوة الاولى بالاتجاه وتساويها بالشدة .

يضاف الى قوانين نيوتن هذه ، قانون الجاذبية العام :

٤ ـ تتجاذب اية ذرتين من المادة بقوة محمولة على المستقيم الواصل بينهما وتتناسب شدتها طرداً مع كتلتي الذرتين وعكساً مع مربع المسافة الفاصلة بينهما .

لقد احدثت قوانين نيوتن ثورة علمية وفلسفية ، فبواسطتها اختزل لابلاس المجموعة الشمسية الى آلة مفهومة ، وهي التي شكلت القاعدة الأساسية للطيران والصواريخ وكذلك علم الفلك ، وعلى الرغم من ذلك بقيت قاصرة عن الاجابة على اسئلة تتعلق بالحركة طرحها ارسطو . لقد حلت قوانين نيوتن مشاكل الحركة كما عرفها نيوتن وليس كما استخدم الكلمة قدماء اليونانيين في القرن الرابع قبل الميلاد أو ما تنطوي عليه من معاني في لغات القرن العشرين .

تستجيب اللغات المستخدمة لحاجاتنا اليومية ، او لربما تمت

صياغتها استجابة لحاجات اجدادنا . اننا لا نستطيع استخدام كلمة منفصلة لكل شيء او موضوع اذ لو فعلنا ذلك لقبعنا نخترع الكلمات الى الابد ، وبهذا يصبح الاتصال مستحيلا . واذا رغبنا بامتلاك لغة على الإطلاق فعلينا أن نستخدم كلمة واحدة للدلالة على اشياء أو حوادث عديدة .. وهكذا فمن الطبيعي أن نقول أن الرجال والجياد تراكض (على الرغم من اننا نفضل أن نقول أن الجياد تعدو) ، وكذلك نجد من الملائم أن نقول أن محرك السيارة يتحرك وأن السيولة المالية في المصرف تتحرك .

تتعلق وحدة هذه المفاهيم بلغاتنا الانسانية وتبدو بعيدة من أي مماثل فيزيائي يمكن للعلم أن يتناوله بسهولة وبدقة . فمن الجنون أن نبحث عن نظرية علمية بسيطة ومتسقة تغطي جريان الماء في الانابيب وجري العدائين في حلبة السباق . ولعله جنون آخر ان نبحث عن نظرية عامة تغطي كل الحركات التي تحدث عنها ارسطو او كل انواع الاتصالات والمعلومات التي اكتشفها الفلاسفة فيما بعد .

نستخدم في لغتنا اليومية الكلمات بشكل يلائم اعمالنا اليومية . لا يسعى العلم لدراسة الكلمات وعلائقها الا في مجال دراسة اللغة بحد ذاتها ولكنه يبحث بالمقابل في ظواهر الطبيعة ، بما فيها طبيعتنا الانسانية ونشاطاتنا ، ويحاول تجميعها في زمر قابلة للفهم . ينطوي هذا الفهم على قابلية تمييز القواسم المشتركة بين الحوادث المتباعدة (مثلا حركة الكواكب في السماء وحركة المتزلج على الجليد) وكذلك على وصف سلوك الظاهرات بدقة وبساطة .

تنتمي المصطلحات العلمية الى قاموس كلماتنا اليومية . لقد استخدم نيوتن كلمات : القوة ، الكتلة ، السرعة ، والجاذبية .. وعندما تستخدم الكلمات لأغراض علمية تعطى عادة معنى خاصا ، وفي بعض الأحيان معنى جديداً . اننا لا نستطيع التحدث بلغة نيوتن عن قوة الظروف أو كتلة الجماهير ، واخيرا عن جاذبية بريجيت باردو ، وبالمثل علينا أن نتوقع ان نظرية الاتصالات لن يكون بمقدورها الاجابة وبشكل معقول عن كل سؤال نصوغه متضمنا كلمة الاتصالات أو المعلومات .

لا تقدم النظرية العلمية الصحيحة إلاّ نادراً ، ان قدمت على الإطلاق، الحلول المرجوة للمشاكل الملحة التي نطرحها بشكل متكرر ، انها لا تعطي الأجوبة عن تساؤلاتنا إلاّ في حالات قليلة ، وهكذا فعوضاً عن عقلنة أفكارنا ، تقوم تلك النظرية بنبذها ، أو تتركها في أحسن الأحوال كما هي . تطلعنا النظرية الصحيحة وبشكل متجدد على جوانب خبراتنا التي يمكن فهمها ببساطة وربطها ببعضها بشكل فعال . سنسعى في هذا الكتاب وراء الأفكار المتعلقة بالاتصالات والتي يكمن ربطها وفهمها على ذلك النحو .

كيف نستطيع الحصول على نظرية تتعلق بمواضيع خبراتنا ، يتحقق لنا ذلك عندما نتمكن من عزل اجزاء من خبراتنا قابلة للربط ببعضها ثم نقوم بتشريحها وفهمها وتوحيدها . تشكل قوانين نيوتن جزءاً هاماً من الفيزياء النظرية ندعوه الميكانيك ، وهي لا تغطي النظرية بأكملها بل هي في واقع الأمر قاعدة لها ، كفرضيات الهندسة بالنسبة لجسم الهندسة ككل . تضم النظرية الفرضيات نفسها الى جانب كل التفاصيل الرياضية والاستنتاجات المنطقية التي تترتب بشكل ملزم على الفرضيات . يتوجب على هذه النتائج ان تتناغم مع ظواهر العالم المعقدة حولنا كي تتحقق صحة النظرية . ان النظرية غير الصحيحة عديمة الفائدة .

تقرر فرضيات وافكار النظرية بشمولها ، اي مدى الظواهر التي تغطيها . وهكذا فقوانين نيوتن للحركة والجاذبية عامة جداً ، فهي تفسر حركة الكواكب وخصائص النواس الضابط للوقت وميزات كل أنواع الآلات والآليات . إلاّ أن هذه القوانين تعجز عن تفسير امواج الراديو .

اعلن جيمس كلارك ماكنسويل عام ١٨٧٣ من خلال كتابه : الكهربائية والمغناطيسية ولأول مرة القوانين الطبيعية التي تربط الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي والتيار الكهربائي ، وبيّن وجود امواج كهرطيسية (امواج راديو) ترتحل بسرعة الضوء . اثبت هرتز ذلك فيما بعد بشكل تجريبي ونعلم اليوم أن الضوء هو امواج كهرطيسية . تمثل معادلات ماكسويل التعبير الرياضي عن نظريته في الكهربائية والمغناطيسية وهي

الأساس المتين لكل الأبحاث الكهربائية . تؤكد ان معادلات ماكسويل تحمل طبيعة عامة جداً ، فهي تفسر كل الظواهر-الكهربائية غير الكوانتية . يتناول فرع من النظرية الكهربائية ، يدعى بنظرية الشبكات ، كل الخصائص الكهربائية للدارات الكهربائية او الشبكات والتي يمكن الحصول عليها بربط ثلاثة انواع من العناصر الكهربائية النموذجية : المقاومات (وهي أجهزة مثل ملفات من اسلاك رفيعة قليلة الناقلية او رقائق من المعدن او الفحم تعيق مرور التيار) والمحرضات (وشائع من اسلاك نحاسية تلف احيانا على نوى مغناطيسية) والمكثفات (صفائح رقيقة من المعدن تفصلها مادة عازلة كالميكا او البلاستيك ، وكانت قارورة لايدن المثال المبكر للمكثفة) . يقول الفيزيائي إن نظرية الشبكات اقل عمومية من معادلات ماكسويل ، لأن الأولى تتناول الخصائص الكهربائية لبنى فيزيائية خاصة نموذجية ، بينما تتناول معادلات ماكسويل الخصائص الكهربائية لأي جملة فيزيائية بما في ذلك تلك البنى الفيزيائية الخاصة والنموذجية وايضاً امواج الراديو التي تقع خارج دائرة نظرية الشبكات .

وهكذا ، فان النظرية الاكثر عمومية والتي تفسر اكبر قطاع من الظواهر هي النظرية الاقوى والاميز ويمكن تخصيصها على الدوام بهدف الانتقال الى الحالات الأبسط . وهذا ما دعا الفيزيائيين للبحث عن نظرية المجال الموحد التي تضم قوانين الميكانيك والجاذبية والكهرطيسية . يبدو جلياً انه يمكن ترتيب كل النظريات في تسلسل وفق عموميتها . واذا كان الأمر كذلك فماهو موقع نظرية الاتصالات في مثل هذا التسلسل .

إن الحياة ليست لسوء الحظ على هذه الدرجة من البساطة ، فمن وجهة النظر المطروحة تبدو نظرية الشبكات اقل عمومية من معادلات ماكسويل ، ومن وجهة نظر أخرى هي اكثر عمومية ، ذلك لأن كل النتائج الرياضية المترتبة عليها ممكنة التطبيق في كل الجمل المهتزة المبنية من مركبات ميكانيكية كما هي مطبقة في دراسة وصلات العناصر الكهربائية النموذجية . نجد بناء على ذلك المقابلات التالية : النابض في الميكانيك

يقابل المكثفة في الكهرباء ، والكتلة تقابل المحرض ، بينما المخمدات ، كتلك التي تراكب على الأبواب لمنع انصفاقها تقابل المقاومة . كان من الممكن في واقع الأمر تطوير نظرية الشبكات لدراسة الجمل الميكانيكية ، وهي تستخدم فعلا في دراسة الصوتيات . اما لماذا نشأت نظرية الشبكات من دراسة العناصر الكهربائية النموذجية ولم تنبثق عن دراسة الجمل الميكانيكية، فالإجابة عن ذلك تكمن في السياق التاريخي وليس بالضرورة الملزمة .

نقول ان نظرية الشبكات هي بمعنى ما اكثر عمومية من معادلات ماكسويل ، فالاخيرة لا يمكن تطبيقها على الجمل الميكانيكية ، بينما الأولى تغطي قطاعاً من الجمل الميكانيكية النموذجية والخاصة وقطاعاً مناظراً من الجمل الكهربائية النموذجية والخاصة . إلا انه ومن جانب آخر تبدو معادلات ماكسويل أكثر عمومية من نظرية الشبكات فهي تنطبق على كل الجمل الكهربائية وليس فقط على صنف من الدارات الكهربائية النموذجية الخاصة .

يتوجب علينا الى حد ما قبول هذا الأمر ببساطة دون أن يكون بمقدورنا شرح الحقيقة بشكل كامل ، ولكن يمكن أن نقول أن هذا كثير . ان بعض النظريات هي نظريات فيزيائية كقوانين نيوتن ومعادلات ماكسويل ، حيث تتناول الأولى الظواهر الميكانيكية بينما تعنى الثانية بالظواهر الكهرطيسية . أما نظرية الشبكات فهي بالضرورة نظرية رياضية ، وبذا يمكن أن تمثل رموزها معاني فيزيائية متباينة تتناول الظواهر الميكانيكية مثلما تتناول الاهتزازات الكهربائية . .

تمثل النظرية الرياضية في اغلب الاحيان نظرية او جملة نظريات فيزيائية ، إذ يمكنها ان تكون الصياغة الرياضية المتسقة والتي تهدف معالجة جوانب محددة من نظرية فيزيائية عامة . تندرج نظرية الشبكات في هذا الاطار فهي في واقع الأمر الجهاز الرياضي اللازم لدراسة مسلك فيزيائي معين مشترك بين الجمل الميكانيكية والكهربائية ، في حين يعالج فرع من الرياضيات يعرف باسم نظرية الكمون مشاكل مشتركة بين

الحقول الكهربائية والمغناطيسية والجاذبية والى حد ما علم الديناميكا الهوائية . تبدو بعض النظريات ، على كل حـال ومن النظرة الأولى رياضية اكثر منها فيزيائية .

نستخدم الكثير من هذه النظريات الرياضية في تعاملنا مع العـالم الفيزيائي . والحساب واحد من هذه النظريات . فإذا أشرنا (لعنصر من مجموعة) من التفاح ، أو الكلاب أو الرجال بالرمز ١ ، ولعنصر آخر بالرمز ٢ ، وهكذا .... ، وإذا استنفذنا بهذه العملية كل الاعداد الطبيعية حتى العدد ١٦ ومتضمناً اياه ، فإننا نشـعر بثقة كاملة انه يمكننا تقسيم المجموعة الى مجموعتين جزئيتين تحتوي كل منهما على ٨ عناصر (١٦ ÷ ٢ = ٨) وان العناصر يمكن ترتيبها في مربع مقسوم الى صفوف من المربعات الصغيرة يحتوي كل منها على اربعة مربعات (لأن ١٦ هو مربع كامل : ١٦ = ٤ × ٤) . واذا حاولنا اكثر من ذلك رصف التفاحات أو الكلاب أو الرجال بكل الأشكال الممكنة لحصلنا على جملة من المتسلسلات المتباينة يبلغ عددها ٢٠٩٢٢٧٨٩٨٨٨٠٠ متسلسلة وهذا العدد يقابل عدد الامكانات التي نستطيع وفقها كتابة الأعداد من ١ الى ١٦ بأوضاع مختلفة من حيث جوارهـا لبعضها . اما اذا استنفذنا في عمليتنا كل الأعداد الطبيعية حتى العدد ١٣ فقط ومتضمنا إياه ، كنا على ثقة كاملة بأن المجموعة يستحيل تقسـيمها الى مجموعات جزئية متساوية لأن العدد ١٣ هو عدد أولي .ولا يمكن التعبير عنه كجداء لأعداد اخـرى .

لا يعتمد كل ما تناولناه على طبيعة الأشياء موضوع البحث . فإذا ربطنا عناصر مجموعة ما من الأشياء مهما اختلفت طبيعتها بالاعـداد الطبيعية ، لما تغيرت النتائج التي نحصل عليها اذا طبقنا عمليات الجمع، أو الطرح ، أو الضرب ، أو القسمة ، أو حتى اذا رصفنا الأعداد بأوضاع مختلفة . تبدو العلاقة بين الأعداد ومجموعات الأشياء طبيعية جداً لدرجة اننا نستطيع تجاوز حقيقة ان الحساب إن هو إلاّ نظرية رياضية يمكن تطبيقها على الظواهر الطبيعية في حدود التقابل الممكن بين خصائص الأعداد وظواهر العالم الفيزيائي .

يطلعنا الفيزيائيون على حقيقة هامة مفادها انه يمكننا الحديث عن مجموع الجسيمات الأولية المنتمية لزمرة معينة ، كالالكترونات مثلا ، إلاّ انه يستحيل ان تربط الاعداد بشكل مفصل لعناصر تلك الزمُرة إذ أن الجسيمات الأولية من نفس النوع لا يمكن تمييز أفرادها بعضها عن بعض ، وهكذا يستحيل أن نتحدث عن رصف الأفراد من نوع واحد من الجسيمات الأولية وبأشكال مختلفة كما فعلنا في حالة الأعداد . يترتب على ذلك نتائج هامة في فرع من الفيزياء يدعى بالفيزياء الاحصائية . وعلينا ان نلاحظ ايضا انه في حين ان الهندسة الاقليدية هي نظرية رياضية تخدم المساحين والملاحين وبشكل فعال في مشاكلهم العملية ، فاننا نعتقد بشكل جازم ان هذه الهندسة غير دقيقة بما يكفي لتوصيف الظواهر الفلكية .

كيف يمكن ان نصنف النظريات ؟ نستطيع الحديث عن نظرية معينة على أنها ضيقة للغاية أو شديدة العمومية في مجال تطبيقها . يمكننا كذلك تمييز النظريات بكونها فيزيائية او رياضية ، فالنظرية الفيزيائية هي تلك التي تصف وبشكل كامل مجالاً معيناً من الظواهر الفيزيائية ، وهي ظواهر محدودة على الدوام من الناحية العملية . تصبح النظرية اكثر تجريداً ورياضية عندما تتناول صفاً منمذجاً من الظواهر او بعض جوانب الظواهر .

تعد قوانين نيوتن نظريات فيزيائية لانها تقدم وصفاً كاملاً للظواهر الميكانيكية كحركات الكواكب او اهتزازات النواس ، اما نظرية الشبكات فهي أقرب الى مجال الرياضيات او التجريد ذلك لانها تصلح لمعالجة أنواع مختلفة من الظواهر الفيزيائية النموذجية . يعد علم الحساب رياضياً وبالغ التجريد ، انه يغطي انواعاً عديدة من العناصر الفيزيائية ، الى جانب امكانية استخدامه لعد الكلاب ولعد الرجال وكذلك لعد الالكترونات (لنتذكر ان الالكترونات غير قابلة للتمييز بين بعضها) . واخيراً يصلح علم الحساب لرصد عدد الأيام الماضية .

تندرج نظرية الاتصالات وفق هذه الاطر في عداد النظريات الرياضية

الشديدة العمومية ، وعلى الرغم من انها انبثقت أصلاً من دراسة الاتصالات الكهربائية ، فهي تتناول القضايا بأسلوب مجرد وطريقة معممة . وهي تقدم في واحدة البيت (Bit) مقياساً شاملاً للكم المعلوماتي بدلالة الاختيار أو الريبة . تنطوي واحدة البيت المعلوماتية على تحديد أو معرفة الخيار بين بديلين متساويي الاحتمال كرقمين أو رسالتين قيد الإرسال . تطلعنا نظرية الاتصالات على عدد واحدات البيت المعلوماتية التي يمكن إرسالها في كل ثانية عبر اقنية اتصال نموذجية أو غير كاملة وذلك بدلالة التوصيف المجرد لخصائص هذه الأقنية . تعلمنا نظرية الاتصالات كيفية قياس السرعة التي يولد وفقها مصدر مرسل (كمذياع أو كاتبة) المعلومات المختلفة ، وتعلمنا هذه النظرية ايضا كيف نرمز او نمثل الرسائل من مصدر مرسل بكفاءة تسمح ببثها عبر قناة من نوع خاص كدارة كهربائية وكذلك تلفت نظرنا الى طرائق تحاشي الأخطاء في الارسال .

يبدو أحياناً استخدام الفهم الذي توفره لنا نظرية الاتصالات في مجال مسألة خاصة عملية امراً صعباً ، ذلك لأن هذه النظرية تعرض لمختلف القضايا في عبارات عامة ومجردة ومع ذلك فكون نظرية الاتصالات ذات طابع مجرد ورياضي عام يجعل مجال تطبيقاتها واسعاً . ولنظرية الاتصالات فوائد جمة فيما يتعلق باللغة المنطوقة والمكتوبة ، وكذلك في الارسال الميكانيكي للرسائل وفي دراسة خصائص الآلات وربما في السلوك البشري أيضا . ويعتقد البعض أن لهذه النظرية دوراً كبيراً في الفيزياء على نحو سنتطرق اليه فيما بعد في هذا الكتاب .

ومهما يكن من أمر ، فنظرية الاتصالات هي ، بشكل مبدئي ، كما وصفها شانون ، النظرية الرياضية للاتصالات ، اذ تصاغ فيها المفاهيم بعبارات رياضية يمكن أن ترتبط بها امثلة فيزيائية منوعة . وعلى الرغم من قابلية استخدامها من قبل المهندسين وعلماء النفس والفيزيائيين ، تبقى نظرية الاتصالات نظرية رياضية أكثر منها نظرية فيزيائية او نفسية أو فناً هندسياً .

ليس من السـهل تقديم نظرية رياضية لعـامة الناس ، ونظرية الاتصالات نظرية رياضية ، وبذا فالادعاء بامكانية شرحها دون اللجوء للرياضيات هو أمر (قد يدعو للسخرية) . وهكذا سيدهش القارئ عندما يواجه العلاقات والمعادلات في هذه الصفحات : انها تعرض الأفكار التي يرد وصفها بكلمات لقد ضمنت الكتـاب ملحقاً رياضياً لمساعدة القارئ غير الرياضي اذا هو رغب بقراءة المعادلات بشكل سليم .

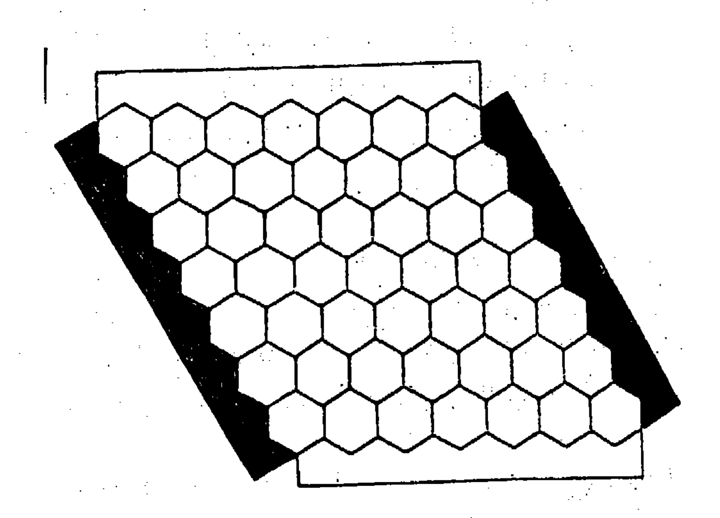
انني على دراية ، في جميع الاحوال ، بما تجلبه صور غير محببة للضرب وللتقسيم وربما للجذور التربيعية وايضا المعاناة المضنية في الصفوف الثانوية . ان مظهر الرياضيات هذا مظهر مضلل اذ انه يركز في المقام الاول على مصطلحات خاصة وحيل عملية ويضـع جانبا وجه الرياضيات الاهم بالنسبة للرياضيـين وربما كان القـارئ قد واجه النظريات والبراهين في الهندسة او لعله لم يواجهها اطلاقا ، ورغم ذلك تبقى النظريات والبراهين ذات اهمية قصـوى في الرياضيات البحتة والتطبيقية . تلخص النتائج الهامة النظريات المعلومات في شكل نظريات رياضية وهي نظريات لانه يمكـن ببسـاطة البرهـان على انها عبارات صحيحة .

ينطلق الرياضيون من فرضيات وتعاريف محددة ، ثم يبرهنون صحة نظريات او قضايا محددة باستخدام براهين وحجج رياضية . كان هذا ما انجزه شانون في كتابه : نظرية رياضية للاتصالات . تتوقف صحـة النظريات على صحة الفرضيات الموضوعة والبراهين المستخدمة لاثباتها .

نعم ان كل ما قدمناه هو التجريد ، ولعل انجع وسيلة لايضاح معنى النظرية ومعنى البرهان هي سوق الامثلة . ولـن استطيع فعل ذلك بمطالبة القارئ غير المتخصص ان يتفهم النظريات الصعبة للاتصالات الواحدة تلو الأخرى ، اذ يتطلب هذا الأمر ، في الواقع ، تركيزاً كبيراً كما يستغرق وقتاً لا بأس به حتى من قبل من كانت لديه خلفية معينة مـن الرياضيات . وخير ما نفعله ان نصل الى محتوى ومعنى واهمية النظريات .

اقترح في هذا السياق اللجو الى امثلة عن نظريات رياضية بسيطة وبراهينها . يتعلق المثال الاول بلعبة اسمها التعويذة ، أما النظرية المراد برهانها فتنص على ان اللاعب الذي سيفتح اللعبة هو الفائز دون شك .

تجري اللعبة على رقعة تتكون من (٤٩) مسدساً منتظماً كما يتضح في الشكل ١ ـ ١ ، حيث يمكن وضع علامات عليها يستخدم اللاعب الأول علامات سودا يحاول توضيعها لتكوين مسار مستمر وان كان متعرجاً بين المساحتين السوداوين على يمين الرقعة ويسارها ، بينما يستخدم اللاعب الثاني علامات بيضاء يحاول توضيعها بدوره لتكوين مسار مستمر وان كان متعرجاً بين المساحة البيضاء في اعلى الرقعة والمساحة البيضاء في أسفلها . يلعب الخصمان بشكل متبادل ، حيث يضع اللاعب علامة واحدة خلال كل لعبة . طبعا سيفتتح اللعبة احد اللاعبين .



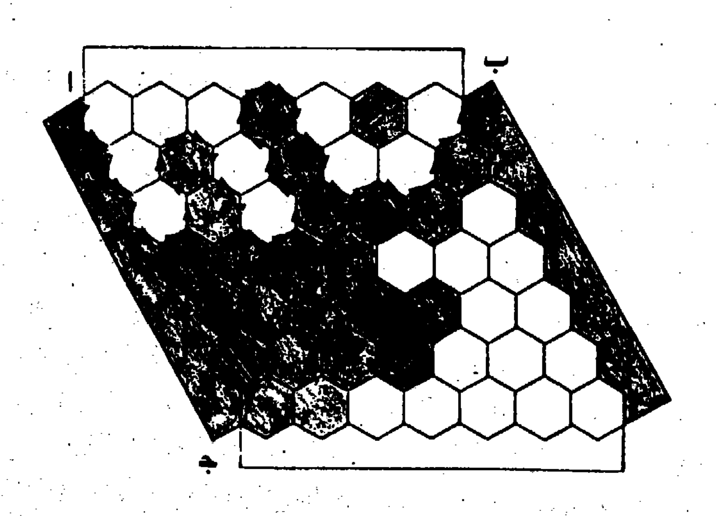
الشكل ١ ـ ١

لكي نستطيع ان نبرهن على ان من سيفتح اللعبة هو المنتصر ، يلزم أولا ان نبرهن على انه في ختام اللعبة ، أي بعد امتلاء كل خانة اما بعلامة سوداء أو بعلامة بيضاء لا بد ان يكون احد اللاعبين قد انتصر .

النظرية ١ : ١ : ستنتهي اللعبة بفوز اللاعب الاول او اللاعب الثاني .

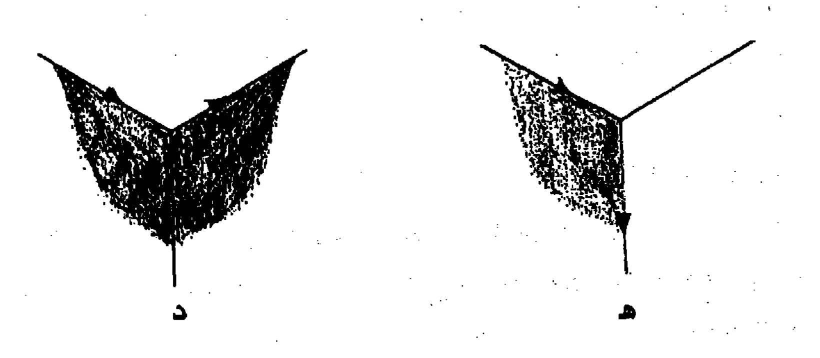
توضيح : يحدث في بعض أنواع اللعب ان مباراة معينة قد تنتهي بعدم فوز أي من المتبارين ، كالشطرنج مثلا حيث تنتهي اللعبة بالانسحاب ، بينما في لعبة (الطرة او النقش) سيفوز احد اللاعبين على الدوام . وهكذا فلكي نبرهن هذه النظرية علينا ان نبرهن انه بتحقيق امتلاء كل خانة بعلامة بيضاء او علامة سوداء فسنحصل اما على مسار اسود بين المساحتين السوداوين يعترض اي مسار ابيض بين المساحات البيضاء او سنحصل على مسار ابيض بين المساحات البيضاء يعترض أي مسار اسود بين المساحات السوداء . بكلمة مختصرة سيفوز الابيض او الاسود .

البرهان : نفترض ان كل خانة مسدسة قد جرى املاؤها بالابيض او الاسود . لنبدأ من الزاوية اليسرى العلوية للحدود البيضاء ، أي النقطة ــ آ ــ من الشكل ١ ــ ٢ ونتابع الحدود بين المسدسات البيضاء والسوداء سنتحرك على الدوام على ضلع من مسدس ما بحيث يقع اللون



الشكل ١ ــ ٢

الأسود على يمين السائر واللون الابيض على يسار السائر ، ان الحدود المتابعة بهذا الشكل ستنعطف عند الرؤوس المتتالية للمسدسات اذ سنواجه عند على رأس احدى حالتين متباينتين. فاما ان يكون هناك مسدسان اسودان متماسان على يمين السائر ومسدس ابيض على يساره كما في الشكل ١ ــ ٣ ــ د ، أو ان يكون هناك مسدسان ابيضان متماسان على يسار السائر ومسدس اسود على يمينه كما في الشكل ١ ــ ٣ ــ هـ



الشكل ١ ــ ٣

نلاحظ انه في كلتا الحالتين سيتحقق وجود مسار أسود مستمر على يمين الحدود ومسار ابيض على يسارها . لنلاحظ ايضا ان الحدود لا تتقاطع ولا تندمج مع ذاتها سواء في الشكل ١ ــ ٣ ــ د او الشكل ١ ــ ٣ ــ هـ ذلك لان مسارا وحيدا عبر كل راس سيحقق وقوع الابيض على يمينه والابيض على يساره . سنكتشف ببساطة أن هاتين الحقيقتين صحيحتان للحدود بين المسدسات السوداء والبيضاء وكذلك بينها وبين حدود الرقعة وهكذا فعلى الطرف الايسر سيقع مسار من المسدسات السوداء حتى الحافة السوداء اليسرى . ولما كان خط الحدود غير قابل للتقاطع مع ذاته فلا يمكنه الالتفاف على نفسه كحلقة مفرغة بل لا بد من ان يصل اتفاقا الى حافة سوداء او الى حافة بيضاء . واذا وصل خط الحدود الى حافة بيضاء أو الى حافة سوداء بوجود اللون الاسود على يمينه واللون

الابيض على يساره كما شرحنا، فمن اي مكان باستثناء ب و جـ يمكن ان نمد خط الحدود بوجودالاسود الى يمينه والابيض الى يساره وعندها يمكن لهذا الخط ان يصل الى احدى النقطتين ب او ج فاذا وصل الى النقطة ــ ب ــ من الشكل ١ ــ ٢ فان المسدسات السوداء التي تقع على يمينه وهي المسدسات المتصلة بالحافة السوداء اليسرى ستكون متصلة ايضا بالحافة السوداء اليمنى ، بينما ستتصل المسدسات البيضاء على يساره بالحافة البيضاء العلوية فقط وسيتحقق عندها فوز الاسود تبدو واضحة في هذه الحالة استحالة فوز الابيض في حالة فوز الاسود اذ ان الشريط المستمر من الخلايا السوداء المتجاورة والممتدة من الحافة اليسرى الى الحافة اليمنى سيحول دون تشكيل شريط مستمر من الخلايا البيضاء حتى الحافة السفلى وبمحاكمة مماثلة نجو ان وصول خط الحدود حتى النقطة ج يعني فوز الابيض .

النظرية : ٢ : يمكن للاعب الذي سيفتح اللعبة ان يحقق الفوز .

توضيح : نعني بالامكانية هنا وجود طريقة للفوز يتوجب على اللاعب ان يكتشفها . تنطوي طريقة الفوز على لعبة اولى معينة (يمكن ان يكون هناك حركات أولى غيرها ولكنها ليست ضرورية اضافة لخطة او وصفة تحدد اللعبة الصحيحة التالية كرد على اية لعبة قد ينفذها الخصم في المراحل اللاحقة من المباراة ، اي اذ نفذ لاعبنا المعتبر عند كل دور من ادوار اللعبة المرسومة بشكل مسبق ، عندها سيتحقق الفوز بصرف النظر عن ردود خصمه .

البرهان : اما ان تكون هناك طريقة ما للعب اذا اتبعها اللاعب المعتبر فسيحقق الفوز بشكل اكيد ، أو انــه مهما حاول من امكانات مختلفــة للعباته ، فان اللاعب الآخر سيتمكن من اختيار بعض اللعبات التي ستمنعه من تحقيق الفوز ، وهكذا سيتمكن اللاعب الآخر من الفوز . نفترض ان اللاعب الآخر يمتلك وصفة اكيدة للفوز . ونذكر هنا ان اللاعب المعتبر هو الذي سيفتح المبارة وان الآخر سيكون التالي بعد الافتتاح بالنسبة

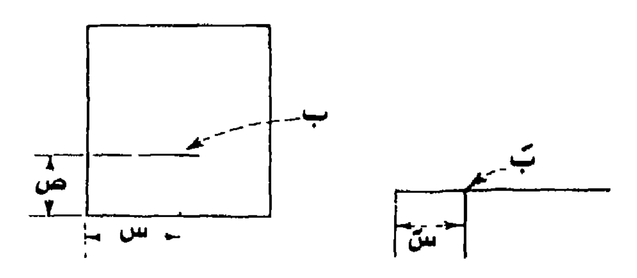
للعبته الاولى . نفرض ان اللاعب المعتبر قد افتتح المباراة باي لعبة وان الآخر قد استجاب بلعبة مقابلة ، وبعد ذلك لجأ اللاعب المعتبر الى تطبيق وصفة الفوز الاكيد التي يعرفها اللاعب الآخر ايضا ، واذا دعته حاجة تطبيق هذه الوصفة عند اي لعبة الى تغطية مسدس كان قد غطاه للتو ، فسيغطي في هذه الحالة اي مسدس آخر غير مشغول . وهكذا ستمتلىء كل خانات الرقعة المدرجة في وصفة الفوز الاكيد . ان حقيقة كون لاعبنا المعتبر قد افتتح المباراة تعطيه امتياز اشغال خانة اضافية من الرقعة وهذا يحول دون خصمه وتغطية خانة محددة ، في حين ان مثل هـذه الاستحالة لا تنطبق على اللاعب ا لمعتبر . وهكذا يمكن للاعبنا المعتبر ان يشغل كل الخانات الواردة في وصفة الفوز الاكيد وبالتالي يمكنه تحقيق الفوز . ان هذا يناقص فرضنا بامكانية فوز اللاعب الآخر ، اي ان هذا الفرض بالتالي غير صحيح ، وعلى العكس فسيكون بامكان اللاعب المعتبر ان يفـوز .

يعتبر ارباب الرياضيات المجردة ان برهاننا هذا غير دقيق بما فيـه الكفاية ، ولهذا البرهان ميزة عجيبة اخرى ، فهو ليس برهانا انشائيا اي انه لا يبين الطريقة المفصلة التي يتوجـب على لاعبنا المعتبر اتباعها لتحقيق الفوز . سنسرد للتو مثالا على برهان انشائي الطابع ، ولكن علينا اولا ان نتحدث من المنظور الفلسفي عن طبيعة النظريات والحاجة لبراهينهـا .

تنطوي الصياغة الدقيقة للمشاكل العامة او المواضيع المدروسة على النظريات الرياضية . وهكذا فحقيقة ان صاحب حركة الافتتاح في لعبة التعويذة يمكنه الفوز هي ضرورة لازمة لتكوين اللعبة وقواعدها . ان نظريات الهندسة الاقليدية ضرورة ناجمة عن الفرضيات الموضوعة .

كان يمكننا ان نرى صحة النظريات مباشرة بقليل من التامل وامعان الفكر . يذكر التاريخ في هذا السياق ان نيوتن الشاب قد وجد نظريات اقليدس واضحة بذاتها وانه كان يتافف من قراءة براهينها .

يتوجب على الرياضيين ان يبرهنوا النظريات بغية التاكد من صحتها، هذا على الرغم من ان بامكانهم تخمين تلك الصحة او الشك بها بشكل مسبق . لقد ادرك نيوتن نفسه اهمية البرهان وقام ببرهان عدد من النظريات باستخدام طرق اقليدس .



الشكل ١ ــ ٤

يتحرك الرياضيون ، على نطاق واسع ، خطوة بخطوة لتحقيق الاحاطة المعرفية بمسالة معينة . انهم يبذلون جهودا كبيرة لبرهنة نظرية تلو اخرى وولا يحاولون استكناه جملة من الامور في ومضة . وهم يفعلون ذلك ايضا بهدف اقناع الآخرين .

يحتاج الرياضي احيانا لبرهنة نظرية معينة لاقناع نفسه بصحتها ، ذلك لان النظرية قد تبدو مخالفة للحس العام . دعونا نعتبر المسالة التالية كمثال : لدينا المربع المبين في الشكل ١ ــ ٤ والذي يساوي طول ضلعه ١ سم . يمكننا تحديد اي نقطة داخل هذا المربع باستخدام عددين : س : بعد النقطة المعتبرة عن الضلع الايسر للمربع و ص : بعد النقطة المعتبرة عن قاعدة المربع . ان كلا من هذين العددين اقل من الواحد بالطبع ، وهكذا فمن اجل النقطة المبينة على الشكل :

س = ٠ر٥٤٧٠٠٠٠٠٠٠٠٠٫٠ (عدد الاصفار العشرية لا نهاية له)
ص = ٠ر٣١٢٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٫٠ (عدد الاصفار العشرية لا نهاية له)

نقرن كل نقاط المربع مع نقاط مقابلة على المستقيم ، وهكذا فكل نقطة في المربع سيقابلها نقطة على المستقيم وكل نقطة على المستقيم سيقابلها نقطة في المربع . نقول اننا حققنا بذلك ارتساما للمربع على المستقيم وهو ارتسام من النوع المعروف بمصطلح الارتسام واحد ــ لواحد وذلك للسبب المبين في تعريفه .

نظرية : يمكننا تحقيق ارتسام واحد ــ لواحد من مربع تساوي مساحته الوحدة الى مستقيم يساوي طوله الوحدة ايضا .

توضيح : لقد بسطنا هذه النظرية واعتبرنا مربعا مساحته الوحدة ومستقيما طوله الوحدة، الا ان هذه التحديدات لاعلاقة لها بصحة النظرية من حيث الاساس .

البرهان : نعتبر الارقام المتتالية المكونة لارتفاع النقطة المعتبر في المربع ص ونكون منها عددا عشريا آخر بوضع هذه الارقام وعلى التتالي في المواقع الفردية بعد الفاصلة العشرية أي الموقع الاول والثالث والخامس وهكذا ، اما في المواقع الزوجية فنضع على لترتيب الارقام المكونة لبعد النقطة عن يسار المربع : س . نحصل بهذا التشكيل على عدد جديد سَ . نعتبر الآن النقطة من المستقيم التي تبعد عن يساره بالمقدار س ولتكن النقطة بَ . ان النقطة بَ هي مرتسم النقطة ب المعتبرة من المربع على المستقيم ،وهذا الارتسام هو واحد ــ لواحد ونبرهن على ذلك ببساطة اذ ان تغيير س او ص سيغير سَ الى عدد جديد معين ، بينما تغيير سَ سيغير بالمقابل كل من س ، ص . وهكذا فلكل نقطة من المربع معرفة ببعديها س ، ص يوجد نقطة واحدة من المستقيم معرفة ببعدها عليه سَ والعكس بالعكس . وهذا هو كل متطلبات ارتسام الواحد ــ لواحد . يتعرض هذا البرهان لبعض الصعوبات التي يمكن التغلب عليها بسهولة في حالة اعتبار بعض الاعداد الخاصة مثل ½ اذ يمكن كتابته على الشكل ٥ر٠ حيث يتبع العدد ٥ للانهاية من الاصفار او على الشكل ٤ر٠ ويتبع العدد ٤ بعدد لا نهاية له من مكرر العدد ٩ . ولو عدنا الى مثالنا عن النقطة المعينة داخل المربع لوجدنا ما يلي :

س = ٠ر ٥٤٧٠٠٠٠٠٠٠
ص = ٠ر ٣١٠٢٠٠٠٠٠٠٠
سَ = ٠ر٣٥١٤٢٧٠٠٠٠٠٠٠٠

ان سلسلة الارقام العشرية الممثلة لنقطة معينة ، في حالة معظم النقاط المعتبرة ، لن تحول الى سسلة من الاصفار او الى جملة مكررة من الارقام وينطبق ذلك على النقاط الممثلة باعداد صماء .

ان مثالنا هذا هو خير مثال على برهان انشائي ، اذ استطعنا ان نبرهن امكانية ارتسام كل نقطة من مربع على نقطة مقابلة من مستقيم بأسلوب الارتسام واحد لواحد ـ لواحد وذلك ببساطة عن طريق التحقيق الفعلي لهذا الارتسام . يفضل عدد كبير من الرياضيين البراهين الانشائية على البراهين غير الانشائية ، ويرفض الرياضيون من المدرسةالحدسية البراهين غير الانشائية فيما يتعلق بالمجموعات اللانهائية ، حيث يستحيل تفحص كل عناصر المجموعة بشكل فردي بحثا عن خاصة معينة .

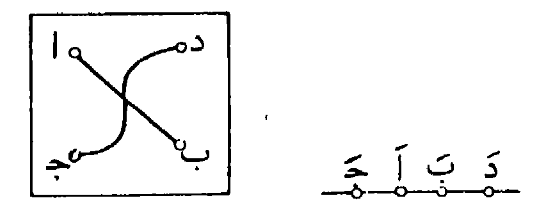
نعتبر الآن قضية اخرى ذات صلة بارتسام نقاط المربع على نقاط المستقيم . نتصور ان مؤشرا يتحرك على طول المستقيم وان مؤشرا آخر يتحرك على المربع ليشير بشكل آني الى النقطة من المربع المقابلة للنقطة من المستقيم حيث يمر المؤشر الاول . يمكننا ان نتصور (خلافا لما سنقوم ببرهانه) ما يلي : اذا حركنا المؤشر الاول ببطىء ونعومة فسيتحرك المؤشر الثاني ببطىء ونعومة ايضا ، وهكذا فلكل تجمع من النقاط على المستقيم يشغل حيزا صغيراً يوجد تجمع مقابل من النقاط يشغل حيزاً صغيراً من المربع .اذن لو حركنا المؤشر الاول مسافة ضئيلة على المستقيم لتحرك المؤشر الثاني مسافة ضئيلة مقابلة على سطح المربع ولو صغرنا المسافة على المستقيم لصغرت بالمقابل المسافة المقابلة من سطح المربع ، وهكذا . لو كان ذلك صحيحاً لو صفنا ارتسام نقاط المربع على نقاط المستقيم بانه ارتسام مستمر .

الا ان الحقيقة هي خلاف ذلك ، فارتسام نقاط مربع على نقاط

مستقيم لا يمكن ان يكون مستمرا بحال من الاحوال . فعندما نتحرك بنعومة وبشكل مستمر على نقاط منحن داخل المربع ، تتحرك النقاط القابلة على المستقيم بشكل عشوائي قافزة هنا وهناك ، ولا ينطبق ذلك على الارتسام الذي قدمناه للتو ، بل على اي ارتسام واحد ــ لواحد من المربع على المستقيم . نستنتج من ذلك ان اي ارتسام من المربع على المستقيم هو ارتسام غير مستمر .

نظرية : ان أي ارتسام واحد ــ لواحد من مربع على مستقيم هو ارتسام غير مستمر بالضرورة .

البرهان : نفرض ان الارتسام واحد ــ لواحد المعنى هو ارتسام مستمر . اذا كان هذا الامر صحيحا اذن لوجب ان ترتسم النقاط من منحن = اختياري آ ب داخل المربع من الشكل ١ ــ ٥ على النقاط من المستقيم الواقعة بين المرتسمين آ ، بَ . اما اذا لم يتحقق ذلك اذن لحدث اثناء حركتنا عبر المنحنى في المربع ان نقفز من احد طرفي المستقيم الى الطرف الآخر (ارتسام غير مستمر) أو نعبر نفس النقطة من المستقيم مرتين (ارتسام غير محقق للشرط الاساسي للارتسام المفترض : واحد ــ لواحد) . نختار الآن نقطة حـَ الى يسار القطعة المستقيمة آ بَ ونقطة دَ الى يمينها ومن ثم نحدد النقاط المقابلة حـ ، د داخل المربع .



الشكل ١ ــ ٥

نرســم المنحني الواصل بين حـ ، د والقاطع للمنحني الواصل بين آ ، ب . يتقاطع هذان المنحنيان في نقطة مرتسمها على المستقيم يقــع بين النقطتين آ َ ، ب َ ، امــا بقيــة النقاط من المنحني حـ د فيجب ان ترتسم على تقاطع تقع خارج القطعة المستقيمة آ َ ب َ وهــذا خلاف فرضنا ان الارتسـام مستمر . اذن فالارتسـام غير مستمر وهو المطلوب .

سنجد فيما بعـد أن لهاتين النظريتين اهميــة خاصــة في نظريــة الاتصالات ، ونعني نظرية ارتسام نقاط المربع على نقاط المستقيم وفق ارتسام واحد ــ لواحد ونظرية كون هذا الارتسام غير مستمر . وهكذا استطعنا برهان نظريتين مفيدتين لنا فيما بعد بخلاف لعبة التعويذة .

ان الرياضيات هي طريقة الاكتشاف ، خطوة بخطوة ، لكل الحقائق المتضمنة في صياغة المسائل والتي لا تبدو واضحة للوهلة الاولى . يعني تطبيق الرياضيات ان يستشف المرء اولاً الحقائق بشكل حدسي ثم يعمد الى اثباتها بالبرهان . نصل هنا الى عقدة إشكالية : فالبراهين التــي اقنعت قدمــاء الرياضيين اصبحت غــير مرضية بالنسبــة للرياضيين المحدثــين .

لقد عبر رياضي معاصر مغمور ونزق ، كان قد راجع أبحاث شانون في نظرية الاتصالات ، عن شكوكه فيما اذا كان المغزى الرياضي لهــذه الابحاث جديراً بالاحترام . تبقى نظريات شانون على الرغم من ذلــك صحيحة وقد توفرت لها البراهين المقنعة لأكثر الرياضيين صلابة . ان البراهين التي قدمتها حتى الآن كبيان وعرض للرياضيات معرضة للنقد اكثر من غيرها من قبل دعاة الرياضيات البالغة التجريد .

لقد كان جل ما فعلته الاشارة الى طبيعة المحاكمات الرياضية اضافة لاعطاء فكرة عن ماهية النظرية وطريقة برهانها . سننطلق ، وكل ذلــك في جعبتنا الى النظرية الرياضية للاتصالات بكل نظرياتها والتي لن نعمد الى برهانها فعلا اضافة لبعض التضمينات والارتباطات التي تمتد وراء كل ما يمكننا برهانه بيقين رياضي .

تتناول نظرية الاتصالات كما أعطانا اياها شانون وكما سبق وقدمت في هذا الفصل مسائل هامة معينة للاتصالات والمعلومات ، ويتسم هذا التناول بكونه شاملاً ومجرداً ، الا ان هذه النظرية غير قابلة للتطبيق على كل ما يمكن صياغته باستخدام كلمتي الاتصالات والمعلومات بمعناها المتداول . تحيط نظرية الاتصالات بكل جوانب الاتصالات التي يمكن تنظيمها وتجميعها بشكل مفيد ومثمر ؛ تماماً كما تعالج قوانين نيوتن الحركات الميكانيكية فقط باكثر مما تعنى بكل الظواهر المتباينة والمسماة والتي كانت في ذهن ارسطو عند استخدامه لكلمة الحركة .

يحاول العلم ، في سعيه الى النجاح ، التعامل مع الممكن . اننا لا نجد ما يدعونا للاعتقاد أن بامكاننا توحيد كل الاشياء والمفاهيم التي نستخدم للدلالة عليها نفس الكلمة ، والاجدى ان نسعى الى جوانب الخبرة التي يمكن ربطها ببعضها ، واذا نجحنا في هذا الربط لاصبحنا أمام نظرية . ان قوانين نيوتن هي نظرية يمكننا استخدامها في التعامل مع الظواهر الميكانيكية ، بينما معادلات ماكسويل هي نظرية تتناول الظواهر الكهربائية، واخيراً نستخدم نظرية الشبكات في مجال انواع بسيطة وخاصة من الاجهزة الميكانيكية والكهربائية . يمكننا استخدام علم الحساب بشكل عام جداً لعد الناس ، الاحجار او النجوم ، بينما نطبق الهندسة لقياس الارض ، البحر ، او المجرات .

ان نظرية الاتصالات هي نظرية مجردة بمعنى أنها تنطبق على أنواع متنوعة من الاتصالات : المكتوبة ؛ الصوتية ، او الكهربائية وذلك بخلاف قوانين نيوتن للحركة ومعادلات ماكسويل والتي هي نظريات فيزيائية بمعنى أنها ترتبط بصنوف معينة من الظواهر الفيزيائية . تعنى نظرية الاتصالات بجوانب هامة ومجردة من الاتصالات ، وهي تنطلق من فرضيات محددة وواضحة لتصوغ نظريات تتعلق بمصادر المعلومات واقنية الاتصالات . انها بهذا المعنى نظرية رياضية ، ولفهمها ، يتوجب علينا أولاً أن نتفهم فكرة النظرية على انها العبارة التي تتطلب البرهان اي كونها نتيجة لازمة لمجموعة من الفرضيات الاولية . ان هذه الفكرة هي قلب الرياضيات كما يفهمها الرياضيون .



الفصل الثاني

أصول نظرية المعلومات

لقد كان الناس دائماً على خلاف فيما يتعلق بقيمة التاريخ فلقد درس بعضهم الاحقاب الغابرة في محاولة استشفاف نظام شامل للعالم يستطيع ان يستجلي بين ثناياه المستقبل والماضي على السواء بينما راى الآخرون في الماضي وصفات ناجعة للنجاح في الحاضر وهكذا يعتقد البعض اننا بدراسة الكشوف العلمية في وقت ما يمكننا أن نتعلم الاستكشاف بينما يشير أحد الحكماء الى أننا لا نتعلم أي شيء من التاريخ ما عدا اننا لا نتعلم أبداً أي شيء من التاريخ ، بينما يؤكد هنري فورد أن التاريخ مجرد هــراء .

يقع كل ذلك ابعد مما ارمي اليه وأبعد من اهداف هذا الكتاب الا انني ساظل متمسكاً بأن بامكاننا أن نتعلم امرين على الاقل من تاريخ العلم .

اولهما أن اعم الكشوف العلمية واقواها لم تنبثق من خلال دراسة الظواهر كما تحدث في الطبيعة وانما من خلال دراسة الظواهر فيما صنعه الانسان وفي المنتجات التكنولوجية اذا صح التعبير ، ذلك أن الظواهر في ادوات الانسان مبسطة ومرتبة بالمقارنة مع تلك التي تقع في الطبيعة وهذه الظواهر المبسطة هي التي يسهل فهمها على الانسان .

لذا فان وجود الآلة البخارية اعطى دفعاً قوياً لظهور علم الديناميكا الحرارية (الترموديناميك) ، وتتجلى في الآلة البخارية ظواهر الحرارة

والضغط والاستبخار والتكاثف بشكل بسيط ومرتب واننا نلحظ ذلك بشكل خاص في اعمال كارنو . وكان كارنو (١٧٩٦ — ١٨٣٢) أول من اقترح التمدد المثالي للغازات (دورة كارنو) وربط به امكان استخلاص اكبر كمية ممكنة من الطاقة الميكانيكية وذلك من مجمل طاقة البخار المتوفرة . اما معلوماتنا عن علمي تحريك السوائل والغازات فقد تراكمت اثر اختراع الطائرات والسفن وليس بسبب وجود الطيور والاسماك .

واخيراً استطعنا معرفة الكثير عن الكهرباء من خلال الاختراعات الانسانية دون اللجوء الى البروق والصواعق .

وسنجد بشكل مقابل تماماً ، جذور نظرية شانون الانيقة والرحبة في الاتصالات عبر التظاهرات المبسطة والمفهومة والمرتبطة بالبث البرقي .

يملي التاريخ علينا درسه الثاني موضحاً الصعوبات الجمة التي يدفعها الانسان ثمناً للمعرفة والفهم . تبدو قوانين نيوتن في عصرنا بسيطة لا مناص من اللجوء اليها على الدوام ، الا انها كانت في يوم من الايام مجرد حلم عجز امامه اكثر الرجال عبقرية وابداعاً . ان المكتشفين انفسهم يبدون في كثير من الاحيان مشتتين بشكل ملفت للنظر حقاً . يتوقع احدنا مثلاً ان يجد في بحث ماكسويل عن الكهربائية والمغناطيسية اعلاناً بسيطاً وجريئاً حول القفزة النوعية التي حققها ، على العكس ، ان بحث ماكسويل ذاك تكتنفه الفوضى وتتداخل فيه امور صغيرة بدت في يوم من الايام على قدر من الاهمية بحيث ان اكثر القراء تخصصاً سيضطر للبحث طويلاً عن الاكتشاف الجديد واعادة صياغته على الشكل البسيط المألوف لديه . الا ان ماكسويل كان قد ثبت قضيته بشكل واضح في مخطوطة اخرى .

وهكذا يقدم لنا تمحيص أصول الافكار العلمية فائدة جمة فيما يتعلق باجراء التقييم الحقيقي للجهود التي وظفت بغية الظفر بالمعارف والافكار الجديدة . لقد كان منظراً مألوفاً في الايام الغابرة ان نرى المفكرين

يحومون حول حواف المكتشفات الجديدة دون أن يكون بامكانهم تنفيذ الخطوة النهائية . نشعر في كثير من الاحيان اننا يجب ان ننوب عنهم بالكلام وتؤكد انهم وصلوا فعلاً الى النتائج النهائية المتوخاة كونهم قد استطاعوا رصف الكثير من الافكار المبتغاة وفق النسق لصحيح . ولعله امر متواتر أن يقع الكثير من الرافضين في فخ مماثل أثناء حياتهم ، فعدد لاباس به ممن استطاعوا حل مشاكل لم يكن لديهم عنها من معطيات في البداية الا افكار ضئيلة ، اعتقدوا فيما بعد انهم احاطوا بالموضوع وبكل جوانبه وتفاصيله .

لذا فالنتيجة الحتمية أن العودة الى اصول الفكرة تساعد في فهم محتوياتها ، وفي مقدمة تلك الاصول ماذا كانت درجة فهم الموضوع قبل انبثاق الفكرة وكيف تم تحقيق الوحدة والوضوح بعد ذلك . الا أن تحقيق الفهم الصحيح يتطلب منا متابعة المسار الفعلي للاكتشافات ، وليس المسار الذي نشعر ان الكشوف العلمية كان من الممكن أو من الواجب ان تسير وفقه ، كما أن علينا ان نقف من المشاكل (اذا استطعنا ذلك) كما وقف منها المكتشفون الاوائل لا كما نراها اليوم .

ان التطلع الى معرفة اصول نظرية المعلومات يدفعنا الى متاهات لا نهاية لها كان من الممكن لي ان اتحاشاها بكل سرور ، الا أن الآخرين يدفعون قرائهم على الدوام للدخول فيها . وكل ما أرجوه أن نخرج منها بدون آثار سلبية تذكر سيما اننا سنعرض للموضوع وفق التسلسل التالـي .

يستخدم علما الديناميكا الحرارية والميكانيك الاحصائي مصطلحاً خاصاً هو الانتروبي ، كما تستخدم نظرية الاتصالات كمية تدعى الانتروبي ، وننوه هنا الى قدم العلمين الاولين بالمقارنة مع نظرية الاتصالات . لقد استخدم الفيزيائي ل. سزيلارد في بحث له عام ١٩٢٩ مفهوماً معلوماتياً معيناً لتحليل تناقض فيزيائي . نخلص من هذه الحقائق الى نتيجة مفادها ان نظرية الاتصالات قد نشأت بشكل ما من الميكانيك الاحصائي .

لقد سببب هذه الفكرة البسيطة والمضللة فوضى كبيرة حتى بين التقنيين . ان منشا نظرية الاتصالات يعود الى المحاولات التي جرت لحل بعض المشاكل المتعلقة بالاتصالات الكهربائية ، وقد دعيت الانتروبي الخاصة بها بالانتروبي بالمماثلة الرياضية مع الانتروبي الخاصة بالميكانيك الاحصائي . تبرز الاهمية الخاصة لانتروبي نظرية الاتصالات في معالجة جملة من المواضيع مختلفة بشكل كامل عن تلك التي يتناولها الميكانيك احصائي .

تعتمد الانتروبي الخاصة بكتلة غازية في الديناميكا الحرارية على درجة حرارة الغاز وحجمه وكتلته ونوعيته تماماً كما تعتمد طاقتها على نفس العوامل . اذا وضعنا كمية من الغاز في اسطوانة مغلقة ومحكمة الا" من احد طرفيها حيث يمكن لمكبس أن يتحرك بحرية وتركنا الغاز يتمدد فان درجة حرارته ستنخفض ويفقد بالتالي جزءاً من طاقته الحرارية ويظهر اثر هذا الانخفاض كفعل دفع على المكبس ، ويمكن لهذا العمل أن يستخدم مثلاً لرفع وزن ما ، وفي هذه الحالة سيدخر الوزن الطاقة التي فقدها الغاز .

أن هذه العملية هي عملية عكوسة ، ونعني بذلك اننا اذا بذلنا عملاً لدفع المكبس نحو داخل الاسطوانة ببطء ولضغط الغاز بالتالي حتى يستعيد حجمه الاصلي واذ ذاك يسترد الغاز طاقته الاولية وكذلك يعود الى ضغطه ودرجة حرارته الاطليين . تتميز هذه العملية العكوسة بثبات الانتروبي وتغير الطاقة خلالها .

تعتبر الانتروبي لذلك مقياساً للعكوسية ، فاذا بقيت الانتروبي ثابتة كانت العملية عكوسة ، ففي مثالنا تتحول الطاقة بشكل متكرر بين شكلها الحراري في الغاز المضغوط وشكلها الميكانيكي في الوزن المرفوع .

ان معظم الظواهر الفيزيائية غير عكوسة . يصاحب العمليات غير العكوسة ازدياد في الانتروبي .

نتخيل على سبيل المثال اسطوانة محكمة لا تسمح بتسرب الحرارة منها واليها ، وقد شطرت الى جزئين . نملىء الجزء الاول بغاز ما ونترك الثاني مفرغاً تماماً . نتصور الان ان الفاصل بين الشطرين قد زال فجاة وبشكل كامل وهذا سيسمح للغاز بالانتشار داخل كل الاسطوانة وسيزيد الانتروبي الا انه سيحافظ على طاقة الغاز دون تغيير .

كان يمكننا قبل زوال الفاصل بين الشطرين الحصول على طاقة ميكانيكية من الغاز بتركه يتدفق داخل الشطر المفرغ من الاسطوانة عبر آلة صغيرة . اما بعد زوال الفاصل بين الشطرين وازدياد الانتروبي فيصبح امر الحصول على الطاقة الميكانيكية المشار اليها مستحيلا . تزداد الانتروبي في ظروف مماثلة بينما تبقى الطاقة ثابتة ، ويحدث هذا مثلا عندما تنتقل الحرارة من جسم ساخن الى جسم بارد ، وقبل تساوي درجتي الحرارة في كلا الجسمين يكون من الممكن الاستفادة من فرق الحرارة للحصول على طاقة ميكانيكية ، اما بعد التساوي فانه يستحيل علينا ان نحول اي جزء من الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية .

وهكذا فان ازدياد الانتروبي يعني نقصان قابليتنا لتغيير الطاقة الحرارية وتحويلها الى طاقة ميكانيكية . تقابل زيادة الانتروبي باختصار انخفاضا في الطاقة الجاهزة .

لقد اعطانا علم الديناميكا الحرارية مفهوم الانتروبي ، الا انه لم يعط تصوراً فيزيائياً مفصلا لهذا المفهوم بدلالة سرع الجزيئات ومواقعها مثلا . يؤمن الميكانيك الاحصائي معنى ميكانيكيا مفصلا للانتروبي في بعض الحالات الخاصة . وبصورة عامة يترافق ازدياد الانتروبي مع نقصان النظام اي ازدياد الفوضى . اما اذا سئلنا ماذا نعني بالنظام ، فعلينا ان نربط النظام بشكل ما مع المعرفة . واذا تمكنا من معرفة موقع وسرعة كل جزيء ضمن تركيب جزيئي بالغا ما بلغ من التعقيد ، فسيصعب علينا اخراجه عن حالة النظام اذ ذاك . تعني الفوضى في الميكانيك الاحصائي عدم قابلية التنبؤ المستندة الى فقدان المعلومات الضرورية عن مواقع وسرع

الجزئيات . اننا نفتقد هذه المعلومات في الحالات العادية عندما يكون نظام المواقع والسرع معقدا بدرجة كبيرة .

لنعد الى مثالنا حيث حبست كل جزئيات الغاز في احد شطري الاسطوانة المعتبرة . اذا كانت هذه الجزئيات بكاملها فعلا في ذلك الشطر واذا كنا بدورنا نعلم ذلك فان الانتروبي ستكون اقل منها في حالة انتشار الغاز في شطري الاسطوانة ، ذلك لان علمنا الاكيد بوجود الجزئيات في الشطر الاول سيؤمن لنا معرفة اكبر عن مواقع الجزيئات بالمقارنة مع الحالة التي ينتشر فيها الغاز عبر شطري الاسطوانة . كلما ازدادت معرفتنا التفصيلية بجملة فيزيائية نقصت ريبتنا بها (مثلا فيما يتعلق بمواقع الجزيئات) وكانت الانتروبي بالتالي اقل . وعلى العكس تزداد الريبة بازدياد الانتروبي .

لذا ارتبطت الانتروبي في الفيزياء بامكانية تحويل الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية . اذا لم تتغير الانتروبي خلال عملية ما ، كانت هذه العملية عكوسة . واذا ازدادت الانتروبي نقصت الطاقة الجاهزة . يفسر الميكانيك الاحصائي ازدياد الانتروبي على انه نقصان في النظام او ، اذا رغبنا ، نقصان في درجة معرفتنا .

ان تطبيقات وتفاصيل الانتروبي في الفيزياء هي اكبر مما عرضته بكثير ، ولكنني اعتقد انني استطعت ايضاح الفكرة وبعضاً من اهميتها . ننتقل الان الى الاهداف والاستخدامات الاخرى لمفهوم الانتروبي في نظرية الاتصالات .

نعتبر في نظرية الاتصالات مصدر ارسال ككاتبة او مذياع ، والذي يمكنه في ظرف معين اصدار رسالة من جملة رسائل ممكنة . يزداد الكم المعلوماتي المنقول عبر الرسالة بازدياد الريبة المقابلة لاصدار رسالة معينة . ان الرسالة المصدرة من اصل عشرة رسائل ممكنة تنقل كماً معلوماتياً أقل من رسالة منتقاة من اصل مليون رسالة ممكنة . ان الانتروبي

نظرية الاتصالات هي قياس لهذه الريبة ، والريبة او الانتروبي هي معيار الكم المعلوماتي المنقول عبر رسالة من مصدر مرسل . ان ازدياد معلوماتنا عن تحديد الرسالة التي ستنبثق عن المصدر سيقلل الريبة وبالتالي الانتروبي وهذا سينعكس في نقص بالكم المعلوماتي .

تترتب نتيجة هامة على ما قدمناه ؛ وهي أن اختلافا جذريا يميز بين الافكار التي كانت وراء تطوير مفهوم الانتروبي في الفيزياء وتلك التي لعبت دوراً اساسياً في تطوير مفهوم الانتروبي في نظرية الاتصالات . ان كلا من المفهومين فعال ومفيد دون ضرورة العودة الى الآخر . وعلى الرغم من ذلك فانتروبي الميكانيك الاحصائي وانتروبي نظرية الاتصالات يمكن ان يعبر عنهما بدلالة الريبة في عبارات رياضية متشابهة . نتساءل هنا عما اذا كان ممكناً صياغة علاقة متميزة ومفيدة بين هذين المفهومين للانتروبي واكثر من ذلك علاقة بين الفيزياء والنظرية الرياضية للاتصالات.

لقد حاول الكثيرون من الرياضيين والفيزيائيين ابراز اهمية نظرية الاتصالات والانتروبي الخاصة بها في مجال الميكانيك الاحصائي ، الا أن هذا الموضوع مازال ضبابياً وغير واضح ، وتزداد حالة التخبط في هذا الموضوع عندما يتسرب اكثر من معنى لكلمة المعلومات الى بحث ما . وهكذا تربط كلمة المعلومات بمفهوم المعرفة وفق معناه المتداول بأكثر مما تربط بالريبة وحل الريبة كما هو الامر في نظرية الاتصالات .

سنعرض للعلاقة بين الفيزياء ونظرية الاتصالات في الفصل العاشر بعد ان نكون قد بلغنا مستوى جيد من فهم تلك النظرية . وكل مااستطيع قوله الآن ان المحاولات الرامية لعقد قران بين الفيزياء ونظرية الاتصالات لم تثمر ومازالت موضع اهتمام كبيرة ، اذ ان تلك المحاولات لم تتمخض عن نتائج اكيدة او تفهم اكبر ، مقابل ما حققته نظرية الاتصالات ذاتها .

تقع اصول نظرية الإتصالات في الابحاث الخاصة بالاتصالات الكهربائية وليس في الميكانيك احصائي ، كما أن بعض المفاهيم المرتبطة بها تعود الى ولادة الاتصالات الكهربائية .

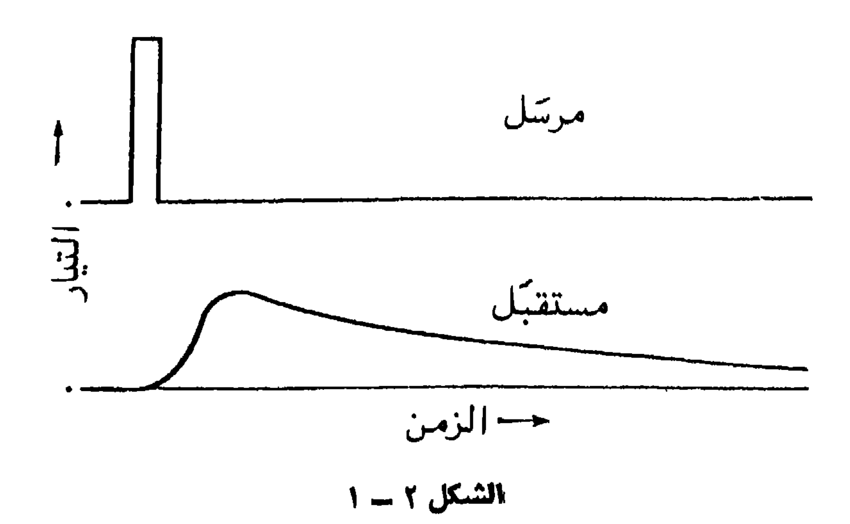
بدا صموئيل ف. ب. مورس اول جهد كبير ناجح لتحقيق الاتصالات البرقية الكهربائية عام ١٨٣٢ خلال رحلة عبر الاطلسي . لقد كانت برقية مورس الاولى أعقد بكثير مما نلم به الآن واحتوت على جملة من الخطوط الطويلة والقصيرة ، ولم تكن سلاسل الخطوط تلك ممثلة لكلمات ، بل مثلت أعدادا ارتبطت بكلمات في قاموس خاص أو كتاب ترميز أكمله مورس عام ١٨٣٧ . سنرى فيما بعد أن هذه الطريقة للترميز هي طريقة فعالة حتما ، ولكنها طريقة غير مصقولة يعوزها الاتقان .

لقد أهمل مورس طريقة الترميز الاصلية هذه بينما كان يعمل في نفس الموضوع مع الفرد فيل وتم ابتكار ترميز مورس (شيفرة مورس) عام ١٨٣٨ تلك الشيفرة التي نستخدمها اليوم . تمثل الاحرف الابجدية وفق هذا الترميز بفراغات وخطوط ونقط فالخط نبضة كهربائية مديدة ، بينما النقطة نبضة كهربائية قصيرة ، واخيرا يقابل الفراغ انقطاع الموجة الكهربائية .

لقد تم مزج الخطوط والنقاط بمهارة لترميز كل الاحرف الابجدية ، مثلا يتواتر الحرف E في اللغة الانكليزية ضمن معظم الكلمات لذا اختير له أقصر رمز ممكن : نقطة واحدة . لقد تم ترميز الاحرف بصورة عامة بحيث تستخدم الرموز القصيرة للاحرف الاكثر تواترا والرموز الطويلة للاحرف الاقل تواترا . ومن الغرابة بمكان أن هذا الخيار قد تم دون الرجوع الى جداول تبين التواترات المختلفة للاحرف في نصوص اللغة الانكليزية ولم تعد الاحرف في أي نص للحصول على مثل هذه المعلومات . لقد تم الحصول على التواترات النسبية لورود مختلف الاحرف بعد مختلف المطارق في الأجزاء المختلفة لعلبة آلة كاتبة .

يمكننا ان نتساءل عما اذا كان باستطاعتنا بث الرسائل باللغة الانكليزية برقيا بسرعة اكبر وذلك بلجوئنا الى ترميز الاحرف بشكل مختلف عن ترميز مورس . تجيبنا نظريتنا المعاصرة اننا لن نحقق زيادة في السرعة بأكثر من ١٥ ٪ لقد كان مورس ناجحا للغاية في هذا المجال ، وكان الامر واضحا بذهنه تماما .

لقد قدم لرميز مورس درسا هاما مفاده أن الطريقة التي تتم وفقها ترجمة الرسالة الى اشارات كهربائية لها اهمية كبيرة ويقع هذا الموضوع مـن نظرية الاتصالات في القلب .

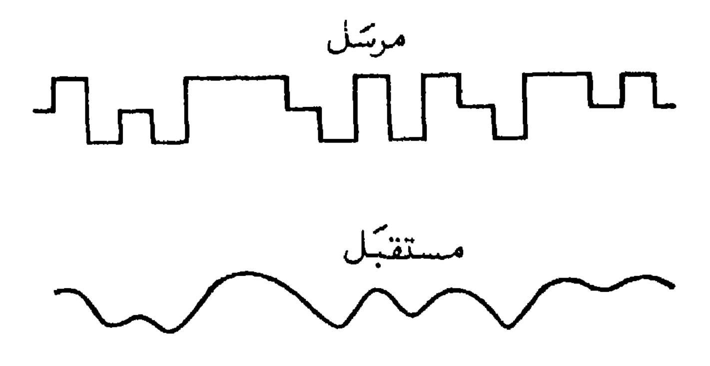


الشكل ٢ ـ ١

أقر الكونغرس الاميركي عام ١٨٤٣ ميزانية خاصة لانشاء دارة برقيات بين واشنطون وبالتيمور . بدأ مورس بمد الاسلاك تحت الارض الا أنـه سرعان ما واجه مصاعب كبيرة تطورت فيما بعد للاضرار بالكابلات تحت المائية ؛ فلجأ الى حل مشاكله الآنية بمد الاسلاك على اعمدة .

لقد بقيت المصاعب التي واجهها مورس في أسلاكه الممدودة تحـت الارض بارزة كمشكلة هامة . ان الدارات المتكافئة في نقلها للتيار الكهربائي المستمر ليست جميعها مناسبة بنفس الدرجة للاتصالات الكهربائية . اذا تم ارسال خطوط ونقاط بسرعة كبيرة عبر دارة تحت أرضية او تحت مائية ، يجري استلامها عند الطرف الاخر في وقت واحد . يبين الشكل ٢ ـ ١ أنه عندما نرسل نبضة كهربائية قصيرة بشكل متواتر عبر فترات انقطاع ، فانها تصل الطرف الآخر من الدارة على شكل نبضة كهربائية مستمرة ومتصلة ، وربما يتداخل هذا الارسال الطويل مع الارسال الخاص

برمز آخر ويحدث بنتيجة التداخل كما وان فترة انقطاع قد مـرت . وهكذا وكما يبين الشكل ٢ ـ ٢ ، عندما نرسل قطار من الاشـارات متميز وواضح فقد يصل الطرف الاخر على شكل موجة كهربائية مستمرة متلوية صاعدة وهابطة وبالتالي صعبة التفسير . اذا حاولنا جعل الخطوط والنقاط والفواصل أطول زمنا فسيتبع تيار الاستقبال تيار الارسـال



الشكل ٢ ـ ٢

بشكل جيد ، الا أن ذلك سيبطىء سرعة الارسال . ويبدو واضحا ان هناك سرعة حدية لارسال النقاط والفواصل لكل دارة ارسال . تكون السرعة منخفضة في حالة الكوابل تحت البحرية لدرجة تزعج مستخدمي الاتصال الكهربائي ، بينما تساعدهم الاسلاك الممتدة على أعمدة بسرع ارسالها الكبيرة لقد تنبه المرسلون الاوائل لهذه المشكلة التي تشـكل بدورها جزءاً هاماً من نظرية الاتصالات .

يمكن أن نتحايل بأشكال مختلفة على الرغم من هذه المحدودية في السرعة لزيادة عدد الاحرف المرسلة عبر دارة معينة وخلال فترة زمنية

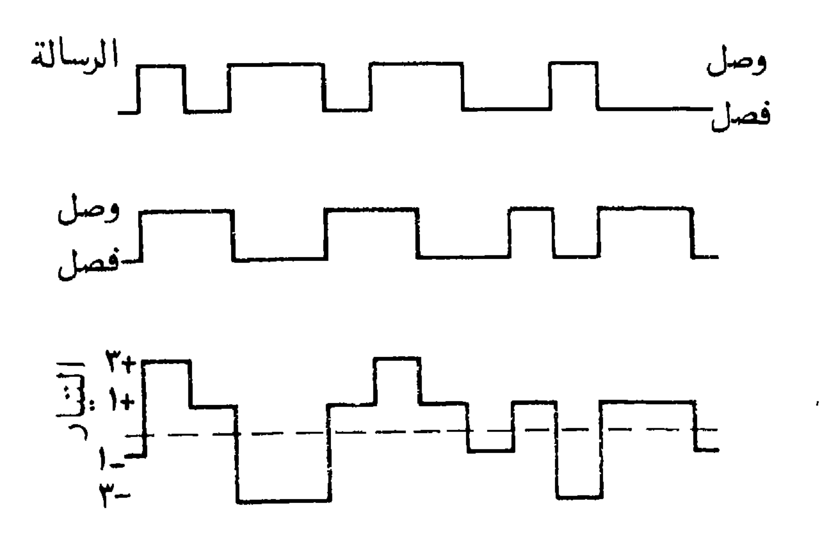
محددة . يستغرق ارسال الخط ثلاثة اضعاف المدة اللازمة لارسال النقطة . وقد تبينت بسرعة الفوائد الحجة التي يقدمها الارسال مزدوج التيار . يمكننا تفهم ذلك بتصور ربط مقياس غلفاني بين نقطة الاستقبال والارض ، والمقياس الغلفاني هو جهاز يضبط ويحدد اتجاه التيارات الكهربائية الضعيفة . يربط المرسل القطب الموجب من بطاريته الى السلك والقطب السالب الى الارض ، ويتحرك بذلك مؤشر المقياس الغلفاني الى اليمين محددا نقطة ، ولتحديد خط ، يربط المرسل القطب السالب من بطاريته الى السلك والقطب الموجب الى الارض ، فيتحرك مؤشر المقياس الغلفاني الى اليسار . نصطلح بذلك على أن اتجاه التيار في جهة معينة (داخل السلك) يمثل نقطة واتجاهه في الجهة المعاكسة (خارج السلك) يمثل خط ، بينما يمثل انقطاع التيار الفاصل (حالة فصل البطارية) . اما في الحالة الفعلية للارسال المزدوج التيار فيستخدم جهاز مستقبل من نوع مختلف .

نستخدم في الارسال وحيد التيار عنصرين لصنع رموزنا . تيار ولا تيار ، واللذين يمكن ان نسميهما واحد وصفر ، ويقابل ذلك في حالة الارسال مزدوج التيار ثلاثة عناصر هي : التيار الامامي أو التيار داخل السلك ، ولا تيار ، والتيار الخلفي أو التيار خارج السلك ، ويمكن تسميتها أيضا : + ١ ، ٠ ، — ١ . نستخدم هنا اشارتي الزائد والناقص للدلالة على اتجاه التيار بينما يبين العدد ١ شدة أو قوة ذلك التيار وهو في هذه الحالة يساوي لدفق التيار في كلا الاتجاهين .

لقد ذهب توماس اديسون عام ١٨٧٤ أبعد من ذلك . ففي نظام ارساله الرباعي استخدم شدتين واتجاهين للتيار ، وكان بمقدوره ارسال رسالة أولى بتغيير الشدة وبصرف النظر عن اتجاه التيار وارسال رسالة ثانية بتغيير الاتجاه مهما كانت تغيرات الشدة . اذا فرضنا أن التيارات تفرق عن بعضها بدرجات متساوية ، فاننا نستطيع تمثيل الشروط الاربعة لتدفق التيار باستخدام الاعداد : + ٣ ، + ١ ، — ١ ، — ٣ . يوضح الجدول التالي تفسير ذلك عند النهاية المستقبلية من الدارة .

التيار المرسل	المعنى	
	الرسالة الاولى	الرسالة الثانية
+ ٣	مرسلة	مرسلة
+ ١	متوقفة	مرسلة
− ١	متوقفة	متوقفة
− ٣	مرسلة	متوقفة

يوضح الشكل ٢ ــ ٣ كيف يمكن لمتتالية مكونة من اربع قيم مختلفة للتيار تمثيل الخطوط والنقاط والفواصل الخاصة برسالتين آنيتين مستقلتين .



الشكل ٢ ــ ٣

يتوقف الكم المعلوماتي المرسل عبر دارة معينة ليس فقط على سرعة ارسال الرموز المتتالية (القيم المتتالية للتيار) بل ايضا على عدد الرموز المختلفة المتوفرة والتي يمكن اجراء الخيار بينها (مختلف قيم التيار) .

اذا استخدمنا كرمزين التيارين + ١ وصفر فقط أو وبنفس الكفاءة التيارين + ١ و — ١ فاننا نستطيع أن ننقل الى المستقبل واحدة فقط من امكانيتين عند لحظة معينة . لقد رأينا للتو انه اذا أجرينا الخيار بين اربعة قيم للتيار (أحد أربع رموز) في وقت معين مثل : + ٣ أو + ١ أو — ١ أو — ٣ فاننا نستطيع بقيم التيار هذه الرموز نقل معلومتين مستقلتين : سواء اكنا نعني صفر أو واحد في الرسالة الاولى أو اذا كنا نعني صفر أو واحد في الرسالة الثانية . وهكذا فان استخدام اربعة قيم للتيار ، ومن أجل سرعة معينة لارسال الرموز المتتالية ، يمكننا من ارسال رسالتين مستقلتين وبسرعة لكل منهما تكافىء ما تسمح لنا به قيمتان للتيار من سرعة في ارسال رسالة واحدة . اننا نستطيع ارسال ضعف العدد من الاحرف في الدقيقة باستخدام أربعة قيم للتيار بالمقارنة مع ما يمكننا ارساله باستخدام قيمتين للتيار .

يقود استخدام التعددية في الرموز الى صعوبات كبيرة . لقد رأينا أن الخطوط والنقاط المرسلة عبر سلك تحت مائي تميل الى الانتشار والتداخل . لذا فان بحثنا عن رمز معين عند نهاية الدارة سيضعنا في مواجهة عدد آخر من الرموز كما يوضح الشكل ٢ — ٢ . وهكذا فالتحديد الأبسط في مثل هذه الحالات كالتحديد ١ وصفر أو + ١ و — ١ هو في واقع الأمر اسهل واكثر تأكيدا من تحديد معقد مثل + ٣ ، + ١ ، — ١ ، — ٣ .

تحد امور اخرى من قابليتنا لاجراء مفاضلات معقدة ، فمثلا تظهر اشارات اضافية على خطوط الارسال والكوابل البحرية ابان العواصف المغناطيسية ، اذ أن تغيرات الحقل المغناطيسي الارضي تولد تيارات كهربائية في الكوابل ، وهذه التغيرات بدورها تتسبب عن الريح الشمسية . واذا دققنا أكثر باستخدام المضخمات الالكترونية الحساسة، لاكتشفنا وجود تيارات كهربائية دقيقة وغير مستحبة بشكل دائم . تشبه هذه التيارات الحركة البراونية للذرات الصغيرة المشاهدة باستخدام المجهر وأيضا اضطرابات جزئيات الهواء وكل ما يرتبط

بدرجات الحرارة والتغيرات الحرارية . ان التيارات الدخيلة ، والتي ندعوها بالضجيج ، موجودة ومهيأة على الدوام لتتداخل مع الاشارات المرسلة .

واذا استطعنا تحاشي ظاهرة التداخل بين النقاط والفواصل والتي نسميها بالتداخل بين الرموز ، فان الضجيج على الرغم من ذلك سيحاول تشويه الاشارة المستقبلية ويزيد بالتالي في صعوبة التمييز بين بدائل متعددة من الرموز . لذا فان زيادة شدة الاشارة المرسلة والتي تتحقق بزيادة التيار المرسل ستساعد في التغلب على آثار الضجيج . ومهما يكن من أمر فهناك حدود للطاقة الممكن استخدامها . يستلزم ارسال تيار عالي عبر كابل بحري كمونا عاليا وهذا بدوره يمكن أن يدمر عزل هذا الكابل ، بل ويمكن ان يسبب دارة قصيرة ، ومن المحتمل أن الكمون العالي الدافع الذي استخدم عام ١٨٥٨ افشل الرسالة البرقية الاولى في كابل عبر الأطلسي .

لقد استطاع حتى رجال البرق الأوائل أن يتفهموا وبالبداهة جانباً لا بأس به من المحدودية في سرع الارسال ، التداخل ، الضجيج ، وكذلك صعوبة التمييز بين بدائل مختلفة من قيم التيار واخيرا القيم العظمى للطاقة التي يمكن توظيفها . الا أن الحاجة كانت تقضي بتجاوز هذا الفهم البدهي للمشاكل المطروحة الى تحليل رياضي عميق لها .

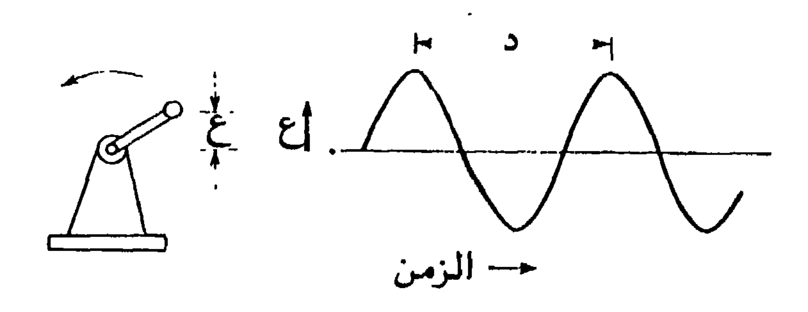
استخدمت الرياضيات منذ وقت بعيد لدى التصدي لهذه المشاكل ، الا أن الايضاح الكامل لها لم يات الا في السنوات الاخيرة . قام ويليام شومسون (وعرف فيما بعد بلورد كالفن) عام ١٨٥٥ بحساب القيم الدقيقة للتيار المستقبل عندما ترسل نقطة او فاصل عبر كابل بحري . أما التناول الأقوى لهذه المشاكل فقد اعقب اختراع الهاتف عام ١٨٧٥ على يد الكسندر غراهام بيل . لا يستخدم الهاتف الاشارات البرقية البطيئة المستندة لقطع ووصل التيار بل يستخدم جملة تيارات تختلف شداتها بشكل مستمر وناعم عبر سعات مختلفة وبسرع تعادل عدة مئات السرع المستخدمة في البرق اليدوي .

ساهم عدد من العقول الجبارة في المعالجة الرياضية لاختراع الاتصال الهاتفي ومن أبرز الأسماء المساهمة : الرياضي الفرنسي العظيم هنري بوانكاريه ، العبقري الانكليزي المتواضع اوليفر هيفيسايد والمخترع ميشيل بابين واخيرا جورج كامبل من شركة الهواتف والبرق الأمريكية .

كانت الطرائق الرياضية التي استخدمها هؤلاء العلماء امتدادا لتلك التي استخدمها الرياضي والفيزيائي الفرنسي جوزيف فورييه في القرن التاسع عشر لدراسة التدفق الحراري . لقد طبقت هذه الطريقة لدراسة الاهتزازات وكانت وسيلة ناجحة لتحليل التيارات الكهربائية المتغيرة على نحو معقد كما هي الحال في تيارات الهاتف والبرق .

يستحيل علينا التقدم دون فهم بعض مساهمات فورييه ، تلك المساهمات التي أثبتت ضرورتها في كل الاتصالات وفي نظرية الاتصالات . ان الافكار الاساسية ولحسن الحظ بسيطة للغاية ، أما عن براهينها والتعقيدات المترتبة على تطبيقها ، فسنضطر الى حذفها هنا .

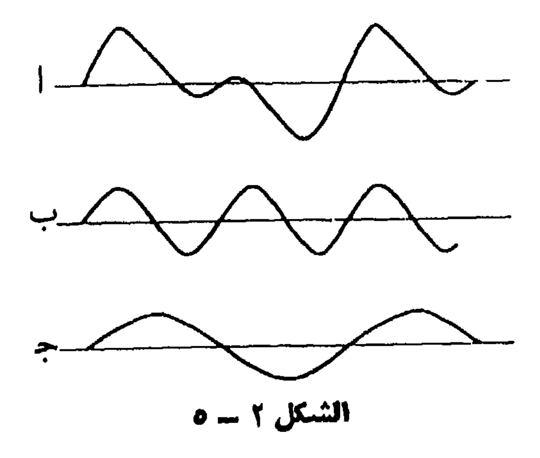
لقد بنى فورييه معالجاته الرياضية لمسألة التدفق الحراري على تابع رياضي خاص يعرف باسم تابع الجيب . يوضح الجزء الأيمن من الشكل ٢ ــ ٤ جزءا من هذا التابع .



الشكل ٢ ــ ٤

يتغير ارتفاع الموجة ع نحو الأعلى والأسفل بمرور الوقت ويتكرر هذا التقلب دائماً وابداً . ليس للموجة الجيبية بداية أو نهاية وهي ليست مجرد منحن مهتز مستمر ، اذ أن ارتفاع الموجة (والذي يمكن أن يمثل شدة التيار أو الكمون) يتغير وفق ايقاع خاص مع مرور الزمن . يمكننا أن نمثل هذا التغير بحركة ذراع مرتبط بمقبض يدور بسرعة ثابتة ، كما هو مبين في يسار الشكل ٢ ــ ٤ . يتغير ارتفاع الذراع فوق المحور ع بشكل جيبي تماماً مع الزمن .

ان الموجة الجيبية هي مجرد مثال بسيط للتغيرات في مجرى الزمن. ويمكن أن نعينها أو أن نصفها وأن نميزها عن غيرها من الأمواج الجيبية بواسطة ثلاث كميات ، احدى هذه الكميات هي أكبر ارتفاع فوق الصفر وتدعى السعة ، أما الكمية الأخرى فهي لحظة بلوغ أكبر ارتفاع وتدعى الطور ، وأخيراً الفترة الزمنية الفاصلة بين بلوغين متتالين للارتفاع الأكبر وتدعى الدور د . نستعيض عادة عن استخدام الدور باستخدام مقلوبه $\frac{١}{د}$ ويدعى التواتر ونرمز لـه بالحرف ت . وهكذا اذا كان دور الموجة الجيبية $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية كان تواترهـا ١٠٠ هزة في الثانيـة واختصاراً ١٠٠ هـ فـ ث . وتعرف الهزة على أنها مجمل التغير بدءاً من قمة معينة للموجة مروراً بحضيض لها وحتى قمة تالية . أما كون الموجة الجيبية دورية الطابع فيعني أن التغير المذكور بين قمتين متتاليتين مروراً بحضيض متوسط يكرر نفسه بشكل متطابق تماماً .



الشكل ٢ ــ ٥

نجح فوريه في البرهان على نظرية حول الامواج الجيبية ادهشت معاصريه كثيراً . فقد اثبت ان تغير اية كمية مع الزمن يمكن ان يمثل بدقة كاملة كمجموع عدد من التغيرات الجيبية تختلف عن بعضها بالسعات والاطوار والتوترات . ويمكن أن تكون الكمية المعنية انزياح وتر مهتز ، أو منسوب الامواج المتلاطمة في البحر ، او درجة حرارة شاردة كهربائية واخيراً شدة او كون التيار في سلك هاتف او مبرقة . ان القوانين الحاكمة لكل هذه الظواهر يمكن أن تخضع لتحليل فوريه ويوضح الشكل ٢ ــ ٥ هــذه القضية بشكل مبسط فارتفاع المنحني الدوري آ فــوق المحور يساوي مجموع ارتفاعي المنحنيين الجيبيين ب ، حـ .

يبدو تمثيل التغيرات المعقدة مع الزمن لكمية فيزيائية معينة مجموع تغيرات جيبية بسيطة مجرد مهارات رياضية وحسب . الاّ أن الاستفادة من ذلك التمثيل تستند في واقع الامر الى حقيقتين فيزيائيتين . لا تتغير دارات ارسال الاشارات الكهربائية مع الزمن ويتبع سلوكها ما يدعى بالنمط الخطي . نفرض مثلاً أننا ارسلنا اشارة واحدة ندعوها باشارة الدخل عبر السلك ورسمنا منحنياً يمثل التغيرات الزمنية لسعة الاشارة المستقبلة ، ثم كررنا نفس العمل من اجل اشارة دخل اخرى ، ثم جمعنا اشارتي الدخل اي شكلنا اشارة جديدة يساوي تيارها عند كل لحظة المجموع البسيط لتياري الاشارتين لحصلنا عند ذلك على اشارة مستقبلة جديدة او اشارة خرج تساوي المجموع البسيط لاشارتي الخرج المقابلتين لاشارتي الدخل المعتبرتين .

نستطيع ان ندرك على الفور ان دارات الاتصالات لا تتغير على نحو هام مع الوقت . يمكننا شرح مفهوم الخطية كما يلي : اذا عرفنا اشارات الخرج وبشكل منفصل لعدد من اشارات الدخل المرسلة بشكل مستقل ، ثم ارسلنا اشارات الدخل هذه في وقت واحد ، فان اشارة الخــرج الناتجة في هذه الحالة تساوي المجموع البسيط لاشارات الخرج المنفصلة المشار اليها . وهكذا ففي دارة كهربائية خطية او نظام بث ، تتصــرف الاشارات كما لو كانت موجودة بشكل مستقل عن بعضها ، انها ببساطة

لا تتداخل . نشير هنا الى ان هذا المفهوم الاخير هو في واقع الامر المعيار الذي نحكم بواسطته على دارة ما على انها خطية .

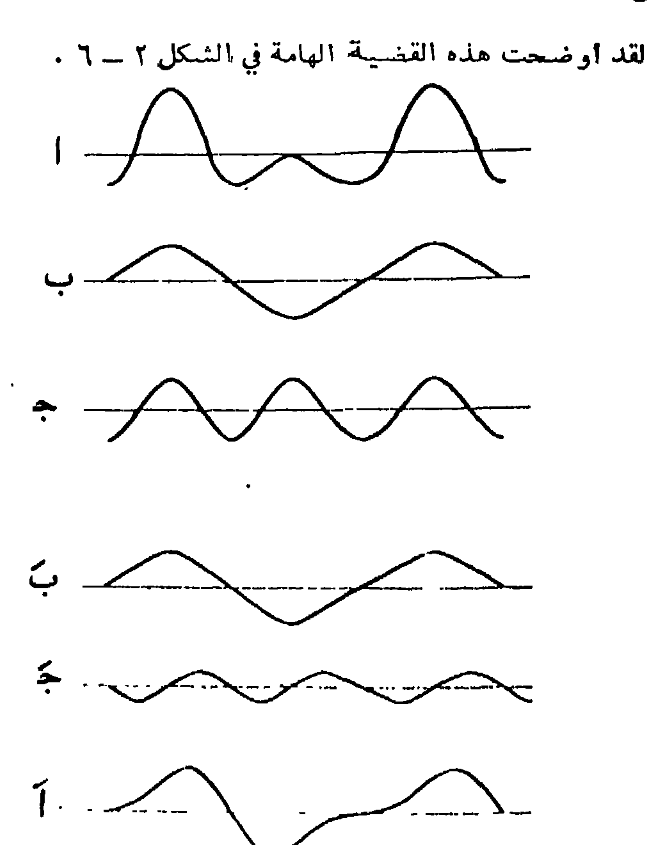
ان كون الخطية تظاهرة مدهشة للطبيعة لا يعني أنها نادرة على الاطلاق اذ تشمل صفة الخطية كل الدارات التي قدمنا لها في الفصل الاول والمؤلفة من المقاومات والمكثفات والمحرضات . كذا شأن الاسلاك والكوابل البرقية. ان كل الدارات الكهربائية ، في واقع الامر خطية ، باستثناء تلك التي تتضمن الانابيب المفرغة او الترانزستورات أو الصمامات ، على الرغم من ان هذه الاخيرة تكون في بعض الاحيان خطية فعلاً .

يمكن لاشارتين برقيتين الانتقال باتجاهين متعاكسين عبر سلك واحد وفي وقت واحد دون أن تتداخلا ويعود ذلك لكون الاسلاك البرقية خطية اي ان الاشارات الكهربائية المحمولة عليها تتصرف بشكل مستقل دون ان تتبادل التأثير . ليست الخاصة الخطية ظاهرة طبيعية عامة ، رغماً عن كونها مالوفة في الدارات الكهربائية ، فلا يستطيع قطاران مثلاً الحركة باتجاهين متعاكسين على نفس الخط الحديدي دون أن يتداخلا . وما على القارىء الا أن يتصور طالع السوء لصف خطي من الكائنات .

دعونا نعد لبث الاشارات عبر الدارات الكهربائية وقد استوعبنا خاصة الخطية المدهشة . لقد راينا للتو انه من اجل معظم اشارات المدخل يختلف شكل اشارة الخرج وتغيرها مع الزمن بالمقارنة مع اشارة الدخل وقد أوضح الشكلان ٢ ـ ١ و ٢ ـ ٢ هذا الامر . الا انه يمكن أن نبرهن بطريقة رياضية (لن نفعل ذلك هنا) اننا اذا استخدمنا اشارة جيبية كتلك في الشكل ٤ ـ ٢ كاشارة دخل الى محور ارسال خطي فاننا نحصل على الاوامر عند المستقبل على موجة جيبية لها نفس الدور او التواتر ، الا أن سعة موجة الخرج الجيبية يمكن أن تكون أقل من سعة موجة الدخل الجيبية ، ويدعى ذلك بتخفيف الاشارة الجيبية ، كذلك يمكن لموجة الخرج الجيبية ان تبلغ الذروة في وقت تال بالنسبة لموجة الدخل الجيبية ؛ وهذا ما نسميه بانحراف الطور او تأخر الاشارة الجيبية .

يتوقف تخامد الموجة ومقدار تاخرها على تواترها . وفي الواقع قد تعجز الدارة كلية عن نقل موجة جيبية بتواتر معين . وهكذا اذا استخدمنا اشارة دخل مكونة من عدة مركبات جيبية سنحصل على اشارة خرج مكونة من عدة مركبات لها نفس التواترات ولكن لها أطوار نسبية مختلفة او تأخرات وكذلك سعات مختلفة . لذا سيختلف ، بصورة عامة ، شكل اشارة الخرج عن شكل اشارة الدخل ، ويمكن النظر الى هذا الاختلاف على أنه متسبب عن التغيرات في التأخرات النسبية والسعات للمركبات المختلفة وترتبط هذه الفروق بالتوترات المختلفة . اذا كان التخامد والتأخر لدارة معينة غير متغيرين بتغير التواترات ، كان شكل اشارة الخرج هو نفسه شكل اشارة الدخل ، وكانت الدارة غير مشوهة .

لقد أوضحت هذه القضية الهامة في الشكل ٢ ـ ٦ .



الشكل ٢ ـ ٦

لدينا في الشكل ٢ ــ ٦ ــ آ اشارة دخل يمكن التعبير عنها كمجموع مركبتين جيبتين ب ، حـ . لا يطرا اي تخفيف او تاخير على الموجة ب عبر الإرسال وهكذا تكون اشارة الخروج ب والتي لهــا نفس تواتر ب مطابقة لـ ب ، الا ّ أن الخرج حـ َ قد نابه التخفيف والتاخير بالمقارنة مع الدخــل حـ ، وهكذا يكون للخروج آ َ ، وهــو مجموع الخرجين ب َ ، حـ َ ، شكلا ً مختلفا عن الدخــل آ . يتكون الخروج ، مــع ذلك ، من مركبتين لهما نفس التواترين المتواجدين في الدخل ، وكل مافي الامر أن مركبات التواتر لها اطوار نسبية مختلفة أو تواترات وسعات نسبية مختلفة في الخرج بالمقارنة مع الدخل .

يتيح تحليل فورييه للاشارات الى مركبات لها تواترات مختلفة دراسة خصائص الارسال لدارة خطية ومن اجل كل الاشارات بدلالة الاخماد والتاخر اللذين تفرضهما الدارة على الامواج الجيبية المختلفة لتواترات التي تجتازها .

يشكل تحليل فورييه اداة فعالة لدراسة مسائل ارسال . لقد زود ذلك التحليل الرياضيين والمهندسين بنتائج واسعة التنوع لم يستطيعوا في البدء فهمها . لذا اخترع رجال البرق الاوائل كل انــواع الاشكال والتراكيب من الاشارات التي تصوروا أن لها مواصفات معينة ، الا ّ انهم في اغلب الاحيان اخطأوا استخدام الرياضيات وكانت مناقشاتهم غــير صحيحة . لقد دارت مناقشات حامية حول كفاءة الاشارات المختلفة في الحد من النقائص التي تفرضها سرعة الدارة وتداخل الرموز ، والضجيج ، وحدود الطاقة المرسلة .

انضم هاري نيكويست عام ١٩١٧ الى الشركة الاميركية للهاتف والبرق وذلك مباشرة بعد حصوله على شهادة الدكتوراه من جامعة يال :(كانت شهادات الدوكتوراه نادرة في تلــك الايام) . كــان نيكويست ماهــراً بالرياضيات وتفوق في هذا المجال على اقرانه الذين تناولوا مسائل البرق وكان على الدوام واضحاً واصيلا ً ومفلسفاً لقضايا الاتصالات . لقــد

تعمق في دراسة مشاكل البرق مستخدماً اساليب فعالة ونظرة ثاقبة . ونشر في عام ١٩٢٤ نتائجه ضمن بحث هام بعنوان : العوامل المؤثرة على سرعة البرق .

شمل هذا البحث عدداً من مسائل البرق ، واوضح الى جانب اشياء اخرى العلاقة بين سرعة البرق وعدد قيم التيار كحالة قيمتين للتيار + ١ ، — ١ او اربعة قيم + ٣ ، + ١ ، — ١ ، — ٣ . يقول نيكويست أننا اذا ارسلنا رموزاً (قيماً متتالية للتيار) بدفق ثابت ، فان سرعة الارسال و ترتبط بعدد قيم التيار م بالعلاقة :

و = ك لع م

حيث ك هو ثابت يعتمد على عدد قيم التيار المتتالية المرسلة في كل ثانية . يعني الرمز لع م لوغاريتم م . من المعلوم ان هناك اسساً مختلفة للوغاريتمات ، وهكذا اذا اخترنا الاساس ٢ فيمكن ان نحسب لع م من اجل بعض قيم م وفق الجدول التالي :

م	لع م
١	٠
٢	١
٣	١٫٦
٤	٢
٨	٣
١٦	٤

يمكننا اجمال موضوع اللوغاريتم من خلال المعادلة التالية المبنية لمعنى لع س :

$$س = ٢^{لع\ س}$$

وبأخذ لوغاريتمات الطرفين لهذه المعادلة تثبين لنا صحة العلاقــة التاليــة .

$$لع\ ٢^{لع\ س} = لع\ س$$

واذا عوضنا عن لع س بالرمز ع لحصلنا على :

$$لع\ ٢^{ع} = ع$$

وهذا يتفق تماماً مع ما ورد في الجدول أعلاه .

سنبين من خلال مثال موائمــة اللوغاريتم . لعلاقــة نيكويست . نفرض أننا نرغب بتحديد خيارين مستقلين لحالة الرسالة : مرسلة أو متوقفة ؛ ١ أو ٠ في نفس الوقت . هناك اربعة تراكيب مختلفة للخيارين المستقلين ١ أو ٠ كما هو موضح في الجدول التالي :

رقم التركيب	الخيار الاول ٠ أو ١	الخيار الثاني ٠ أو ١
١	٠	٠
٢	٠	١
٣	١	٠
٤	١	١

واذا أردنا أكثر من ذلك تحديد ثلاثة خيارات مستقلة من الصفر أو الواحد في نفس الوقت نحصل على التراكيب الثمانية المختلفة التالية :

رقم التركيب	الخيار الاول ٠ او ١	الخيار الثاني ٠ او ١	الخيار الثالث ٠ او ١
١	٠	٠	٠
٢	٠	٠	١
٣	٠	١	٠
٤	٠	١	١
٥	١	٠	٠
٦	١	٠	١
٧	١	١	٠
٨	١	١	١

واذا اردنا وبشكل مماثل تحديدا اربعة خيارات مستقلة من الصفر او الواحد في نفس الوقت لحصلنا على ١٦ تركيب مختلف ، وبصورة عامة اذا اردنا تحديد ع خيار مستقل من الصفر او الواحد لحصلنا على $٢^{ع}$ تركيب مختلف .

اذا استطعنا تحديد ع خيار مستقل من الصفر او الواحد في وقت واحد لاستطعنا بالنتيجة ارسال ع رسالة مختلفة في نفس اللحظة وتكون سرعة الارسال متناسبة مع ع ، ولكن بارسالنا ع رسالة في نفس الوقت نواجه $٢^{ع}$ تركيب ممكن من ع خيار مستقل من الصفر او الواحد. وهكذا لارسال ع رسالة في نفس اللحظة نحتاج لارسال $٢^{ع}$ رمز مختلف او قيمة تيار . نفرض اننا نستطيع الاختيار من $٢^{ع}$ رمز مختلف . يعلمنا نيكويست وجوب حساب لوغاريتم عدد الرموز للحصول على سرعة الارسال ، اي :

$$لع\ ٢^{ع} = ع$$

وهكذا فعدد الخيارات المستقلة من الصفر او الواحد التي يمكن تمثيلها في وقت واحد وهو عدد الرسائل المختلفة التي يمكن ارسالها في نفس اللحظة ، يساوي لوغاريتم عدد الرموز .

تنص علاقة نيكويست على ان الانتقال من البرق المثنى الذي يستخدم الفصل والوصل الى برق التيارات الثلاثة (+ ١ ، ٠ ، — ١) ، يمكن من زيادة سعة ارسال الاحرف او الرموز الاخرى بنسبة ٦٠٪ واذا استخدمنا اربعة قيم للتيار (+ ٣ ، +١ ، — ١ ، — ٣) فتتضاعف السرعة . كان هذا ما فعله بالطبع اديسون في مبرقته الرباعية اذ ارسل رسالتين عوضا عن واحدة . أواضح نيكويست بعد ذلك ان استخدام ثمانية قيم للتيار (٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ او +٧ ، +٥ ، +٣ ، +١ ،

ـ ١ ، ـ ٣ ، ـ ٥ ، ـ ٧) سيضاعف سرعة الارسال اربع مرات بالمقارنة مع قيمتين للتيار . الا انـه بين ان الاضطرابات في تخفيف الدارة ، التداخل او الضجيج ، وحدود الطاقة الممكن استخدامها ، كل ذلك سيزيد في صعوبة استخدام عدة قيم للتيار .

عرف نيكويست ، بالعودة الى السرعة التي يمكن ارسال الاشارات وفقها ، سرعة الخط على انها نصف عدد مركبات الاشارة (نقاط ، فواصل ، قيم تيار) التي يمكن ارسالها في الثانية . سنجد ان هذا التعريف اكثر ملائمة على وجه التخصيص لاسباب لم يوضحها نيكويست في بحثه الاول .

كان من المعتاد ارسال الاشارات الهاتفية والبرقيةعبر نفس الاسلاك خلال الفترة التي قام عندها نيكويست بابحاثه يستخدم الهاتف تواترات اعلى من ١٥٠ هـ. ف. ث ، بينما يمكن تنفيذ الارسال البرقي بواسطة اشارات ذات تواترت اخفض . اوضح نيكويست كيفية تشكيل الاشارات البرقية بحيث لا يكون لها مركبات جيبية بتواترات عالية لدرجة يمكن معها سماعها كموجة متداخلة عبر الهواتف المربوطة الى نفس الخط . وذهب نيكويست ابعد من ذلك بملاحظته ان سرعة الخط وبالتالي سرعة الارسال تتناسب مع عرض او امتداد مجال او حزام التواترات المستعملة في البرق ، وتدعو الآن في مجال التواترات هذا بعرض حزام الدارة او الإشـارة .

برهن نيكويست اخيرا بتحليل صنف معين من الاشارات البرقية ، ان هذه الا- شارة كانت تحتوي في كل الاوقات على مركبة جيبية مستقرة ذات سعة ثابتة . لم تكن هذه المركبة بذات فائدة لدى المستقبل ، على الرغم من كونها جزءا من الطاقة المرسلة المستخدمة ، اذ كان ممكنا التنبؤ باضطراباتها الدائمة المتواترة وبالتالي تجهيزها عند المستقبل بدلا من ارسالها عبر الدارة . اشار نيكويست الى مركبة الاشارة هذه العديمة الفائدة وذكر انها لا تنقل اي معلومة مفسرة واسماها لذلك فائضة ، وهو مصطلح سنواجهه فيما بعد .

تابع نيكويست دراسة مشاكل البرق ونشر عام ١٩٢٨ بحثا هاما آخر بعنوان : (جوانب هامة من نظرية الارسال البرقي) اثبت فيهعددا من النقاط الهامة . بين نيكويست انه اذا ارسلنا عددا من قيم التيار المختلفة مساويا ٢ ن في الثانية ، فان المركبات الجيبية للاشارة التي تتجاوز تواترتها القيمة ن هي مركبات فائضة ، بمعنى انه لا ضرورة لها اطلاقا في استنتاج ترتيب قيم التيارات المرسلة من خلال الاشارة المستقبلة . شرح نيكويست بعد ذلك كيفية تكوين اشارة لا تحتوي توترات حول القيمة ن هـ ف ث والتي يمكن للمستقبل بواسطتها استنتاج قيم التيار المرسلة كان هذا البحث الثاني لنيكويست اكثر غنى بالتفاصيل والكميات وادق في نفس الوقت بالمقارنة مع بحثه الاول . يشكل هذان البحثان المادة الاكثر اهمية المتضمنة في نظرية الاتصالات .

كان ذهن ر. ف.ل. هارتلي منشغلا في نفس الوقت بالابعاد الفلسفية لارسال المعلومات ، وهارتلي هو مخترع الهزاز المعروف باسمه هزاز هارتلي . وقد لخص تأملاته في بحث نشره عام ١٩٢٨ بعنوان (ارسال المعلومـــات) .

لقد كان لهارتلي طريقة مشوقة في صياغة مسالة الاتصالات ، وهي واحدة من طرائق وضع القضايا بالشكل المباشر والواضح خاصة ثوب البداهة الذي تبدو به عند عرضها ولكنها وعلى الرغم من ذلك تحتاج لسنوات حتى تتنامى النظرة الثاقبة التي تؤهل احدا ما لبسطها رأى هارتلي المرسل وقد جهز بمجموعة من الرموز (احرف الابجدية مثلا) يمكنه انتقاء ما شاء منها بشكل عقلي وارسالها رمزاً بعد رمز مولدا بذلك سلسلة من الرموز ، ولاحظ ان حدثا تصادفياً كدحرجة عدد من الكرات في مجموعة من الجيوب يمكنه بشكل مماثل لتوليد هذه السلسلة . عرف بعد ذلك المعلوماتية في الرسالة ورمز لها بالحرف هـ ، ووفق تعريفه تساوي هـ لوغاريتم عدد كل الاشكال المختلفة للسلسلة التي كان يمكن اختيارها ، وبرهن ان : هـ = ل لع س ، حيث ل هو عدد الرموز المكونة للسلسلة ، و س عدد الرموز في المجموعة التي يتم انتقاء الرموز المكونة للسلسلة منها .

بعد ما قدمناه مقبولا في ضوء معارفنا المعاصرة عن نظرية المعلومات اذا تم انتقاء الرموز المتتالية بشكل مستقل وكانت رموز المجموعة متكافئة في احتمال انتقائها . وكل ما يلزمنا في هـذه الحالـة ان نلاحظ كما في السـابق ان لوغاريتـم عـدد الرمـوز س أي لع س يسـاوي عـدد الخيارات المستقلة للصفر او الواحـد التي يمكن تمثيلها او إرسـالها في وقت واحد ولعله أمر منطقي ان تساوي سرعة إرسال المعلومات جداء سرعة إرسال الإشارات في الثانية : ل وعدد الخيارات المستقلة للصفر او الواحد المحمولة في كل إشارة .

ذهب هارتلي ابعد من ذلك بتناوله موضوع ترميز الرموز الاولية (احرف الابجدية مثلا) بدلالة الرموز الثنائية (مثلا سلاسـل النقاط والفراغات والخطوط وفق ترميز مورس) ، وبرهن أن البث الاسـرع للرسائل يتطلب ان تكون اطوال الرموز الثانوية (تمثيل مورس الرمزي) محكومة بقيود اختيار الرموز (مثلا حقيقة ان الحرف E في اللغـة الانكليزية اكثر تواترا وبالتالي اكثر اختيارا من الحرف Z) . كنـا قد اوضحنا ان مورس نفسه قد تفهم هذا الامر الا ان هارتلي وضعه في صيغة سهلة المنـال سيما الطرائق الرياضية وفتح ذلك البـاب على مصراعيه امام ابحاث اخرى تالية . اقترح هارتلي خطة لتطبيق هـذه الاعتبارات على الاشارات المستمرة كاشارات الهاتف او اشارات الصور .

اثبت هارتلي اخيراً وبما يتلاءم مع نيكويست ان كمية المعلومات الممكن ارسالها تتناسب مع جداء عرض الحزام في وقت الإرسال . الا ان ذلك يضعنا في حيرة من عدد قيم التيارات المسموحة والتي لها اهميتها اعلى سرعة الارسـال . كيف يمكن ان نرقمها .

مرت نظرية الاتصالات بفترة طويلة من الاسترخاء والراحة بعد نيكويست وهارتلي . اذ انشغل العاملون فيها بدراسة وبناء انظمـة اتصالات متخصصة . وتطور هذا الفن الى اشكال معقدة فعلا خلال

الحرب العالمية الثانية . لقد تم استيعاب انظمة واجهزة اتصالات جديدة على حساب قصور كبير في صياغة المبادىء الفلسفية .

كان امراً هاماً اثناء الحرب معرفة مسارات الطائرات من خلال معلومات رادارية غير دقيقة يشوبها الضجيج ، وذلك لتسهيل اسقاط تلك الطائرات . ودفع هذا بدوره الى السطح قضية اخرى : ماذا لو مثل تيار كهربائي متغير المعلومات الخاصة بموقع طائرة ولكن قد اضيف اليه تيار شائب آخر لا معنى له اي ضجيج . يمكن أن تكون التواترات الاكثر ورودا في الاشارة مختلفة عن التواترات الاكثر وردا في الضجيج ، عندها يكون من المرغوب فيه تمرير الاشارة والضجيج المضاف اليها في دارة كهربائية او مرشح تضعف بنتيجته التواترات الواردة في الضجيج بينما لا تتأثر تلك الواردة في الاشارة . يمرر بعد ذلك التيار الكهربائي الناتج في دارات اخرى في محاولة لمعرفة ماذا يمكن ان تكون عليه الاشارة الاصلية من دون ضجيج بعد ثوان قليلة من اللحظة الراهنة . ماذا يمكن ان يكون ذلك النوع من تركيب الدارات الكهربائية الذي سيسمح بأحسن تنبؤ عن قيمة الاشارة الحقيقية بعد ثوان في المستقبل اعتبارا من الاشارة الحالية المشوبة بالضجيج .

نتناول في هذه المسالة اساسا مجموعة كاملة من الاشارات الممكنة (مسارات للطائرة) وليس اشارة واحدة وهكذا فليس في مقدورنا ان نحدد مقدماً أي الاشارات تهمنا ، والاسوا من ذلك اننا نتعامل مع ضجيج لا يمكن التنبؤ بـه .

لقد حل هذه المشكلة في الاتحاد السوفييتي العالم كولوموغروف ، بينما حلها في امريكا وبشكل منفصل العالم نوربرت وينر . كان وينر رياضياً أهلته خلفيته لمعالجة هذا النوع من المسائل واكمل اثناء الحرب وثيقة دعيت بالخطر الاصفر لما سببته من صداع لدارسيها حل فيها المسألة الصعبة بشكل كامل .

شهدت فترتا الحرب وما بعدها انشغال رياضي آخر هو كلود .
اي شـانون بالحالة العامـة لمسالة الاتصـالات بدأ شـانون باعتبـار حسنات انظمة الاتصالات الحديثة وسعى لايجد معيار اساسي لمقارنة ميزاتها . نشر شانون عام ١٩٤٨ . بحثا في جزئين يعتبر القاعـدة الاساسية لنظريـة الاتصالات المعاصرة ، ونشـر واينر في نفس العـام كتابه (السيبيرنتيك) والذي يعرض للاتصالات والتحكم .

يتناول شـانون وواينر على حد سواء مشكلة الاحاطة بأي اشـارة منتقاة من زمرة او مجموعة من الرموز الممكنة وليس مشكلة اشـارة واحدة بحد ذاتها . لقد حدث تبادل حر للافكار بين مختلف العاملين في المعلوماتية قبل نشر بحث شانون وكتاب واينر ، حيث تظهر افكـار وعبارات متشابهة في المرجعين ، الا ان تفسير شانون يبقى مع ذلـك وحيدا من نوعـه .

ارتبط اسم واينر مع مهمة استخلاص اشارات مجموعة معينة من ضجيج معروف النوعية . سبق ان قدمنا آنفا مثالا عن ذلك . يتبع الطيار المعادي مسارا يختاره بنفسه ، وتضيف اجهزة راداراتنا ضجيجا طبيعي المنشأ الى الاشارات الممثلة لموقع الطائرة . وهكذا يصبح لدينا مجموعة من الاشارات الممكنة (المسارات المحتملة للطائرة) الخارجة عن دائرة اختيارنا ممزوجة مع ضجيج هو بدوره ليس من اختيارنا وعلينا ان نصل الى التقدير الامثل لقيمة الاشارة الحالية او المستقبلة (الموقع الحالي او التالي للطائرة) وبصرف النظر عن الضجيج المتواجد .

اما اسم شانون فقد اقترن بمواضيع اخرى كترميز رسـائل منتقـاة من مجموعة معينة بحيث يمكن نقلها بوجود الضجيج بسرعة وبدقة وعلى سبيل المثال تفترض ان لدينا مصدرا للارسال هو نص باللغة الانكليزية لم نقم باختياره ، اضافة لدارة كهربائية ككابل برق مشوب بالضجيج ، هو بدوره ليس من اختيارنا ايضا . الا أن المسألة التي عالجها شانون تسمح لنا اختيار طريقة ترميز الرسالة باشارة كهربائية وكم هي القيم

المختلفة للتيار الكهربائي التي سنسمح بها مثلا وما هو عدد ما سنرسله منها في كل ثانية . ليست المسألة اذن هي معرفة طريقة معالجة الاشارة والضجيج المضاف اليها بهدف الوصول الى افضل تقدير للاشارة ، بل هي تحديد نوعية الاشارة المزمع ارسالها لتحقيق ايصال امثل للرسائل التي هي من نمط معين عبر نوع محدد من الـدارات التي يشـوبها الضجيـج .

تشكل قضية الترميز الفعال هذه مع نتائجها المادة الرئيسية لنظرية المعلومات حيث تعتبر مجموعة من الرسائل ، ويعكس البحث روح اعمال كل من كولوموغروف ، واينر موريس ، وهارتلي .

لعله من غير المجدي ان نحاول هنا مراجعة اعمال شانون ، سيما وان هذا الكتاب برمته يدور حول هذه الاعمال وسنرى فيما بعد ان هذه الاعمال تلقي اضواء كاشفة على المشاكل التي اثارها نيكويست وهارتلي وتذهب بعيدا وراء تلك المشاكل[5] .

يجب ان نذكر اسمين آخرين عند استعراضنا لنظرية المعلومات نشر دينيس غابور عام ١٩٤٦ بحثا بعنوان نظرية الاتصالات ، ومهما كان من ايحاء هذا العنوان فقد فات البحث تضمين الضجيج الذي يقع في القلب من نظرية الاتصالات المعاصرة . شهد عام ١٩٤٩ بحثا آخر لتالر بعنوان الحدود النظرية لسرعة ارسال المعلومات ، وكان هذا البحث موازيا لعمل شانون وبشكل جزئي .

لقد انطوى جوهر هذا الفصل على حقيقة مفادها أن نظرية الاتصالات العامة التي قدمهـا لنا شانون قد نمت وترعرعت من دراسة المسـائل المتخصصة للاتصالات الكهربائية . واجه مورس مشكلة تمثيل الاحرف الابجدية بنبضات كهربائية طويلة او قصيرة تتخللها فواصل لا نبض فيها ـ اي بخطوط ونقاط وفراغات البرق المعهودة . لقـد اختار وبشكل صائب تمثيل الاحرف المتواترة بتراكيب قصيرة مـن الخطوط والنقاط والاحرف النادرة بتراكيب اطول ، وكان هذا الخيار الخطوط الاولى في الترميز الفعال للرسائل ، وهو ركن اساسي من نظرية الاتصالات .

استخدام تلاميذ مورس شدات واتجاهات مختلفة لدفق التيار الكهربائي بهدف إعطاء المرسل فرص اكثر لانتقاء الإشارات بالمقارنة مع الخيارين التقليديين : ارسال او توقف . زاد ذلك من عدد الاحرف المرسلة في واحدة الزمن ولكنه رفع من حساسية الإشارة لاي اضطراب كهربائي غير مرغوب فيه مما يسمى بالضجيج كذلك قلل من امكانات الدارات للاستجابة السريعة في حالات التغيرات السريعة للتيار .

برزت الحاجة لتقييم الميزات النسبية لعدد متنوع من الإشارات البرقية ، وكان لا بد من اداة رياضية لتحقيق ذلك . وليس غريباً أن يكون تحليل فورييه هو الاداة ، إذ بواسطة ذلك التحليل يمكن تمثيل اية إشارة كمجموع امواج جيبية ذات تواترات مختلفة .

إن معظم دارات الاتصالات من النوع الخفي ويعني ذلك أن تواجد عدد من الإشارات في نفس الدارة لا يؤدي لاي تداخل او تبادل للتأثير بينها . ويمكننا ان تبرهنه إن اثر الدارة الخطية على الموجة الجيبية ينحصر باضعافها او تخفيفها وتأخير زمن وصولها هذا على الرغم من حقيقية انه حتى الدارات الخطية قد تفيد في اشكال معظم الامواج . وهكذا فعندما تمثل موجة معقدة كمجموع امواج جيبية بتواترات مختلفة، يمكن اجراء حساب بسيط لاثر الدارة الخطية على كل مركبة جيبية بشكل منفصل وبجمع المركبات الجيبية المخففة او المضعفة نصل الى قيمة الموجة المستقبلة . المقابلة للموجة الاصلية المعقدة .

اثبت نيكويست ان عدد قيم التيار المختلفة التي يمكن إرسالها عبر دارة معينة في ثانية يساوي ضعف المجال الكلي او حزمة التواترات المستخدمة . وهكذا يتناسب عدد الاحرف المرسلة مع عرض الحزمة اثبت كل من هارتلي ونيكويست ايضا ان سرعة نقل الأحرف تتناسب مع لوغاريتم عدد قيم التيار المستخدمة .

احتاجت النظرية المتكاملة للاتصالات ادوات رياضية اخرى وافكار

محدثة . وارتبط ذلك الجانب من النظرية بأعمال كولوموغروف ووواينر اللذين درسا مشكلة إشارة مجهولة من نوع معين تشوشها إضافات من الضجيج . كيف يمكن ترشيح الإشارة على الرغم من وجود الضجيج، هكذا ما اجاب عنه بالتفصيل كل من كولوموغروف ووواينر .

تختلف المسألة التي نذر شانون نفسه لها عما تقدم . نفرض أن لدينا مصدر إرسال ينتج رسائل من نوع معين كالنصوص الإنكليزية مثلا . ونضيف الى ذلك فرضاً آخر مفاده أن بحوزتنا قناة اتصال ذات مواصفات محددة ولكنها مشوبة بالضجيج . فكيف يمكننا أن نمثل أو نرمز الرسائل من المصدر المرسل باستخدام الإشارات الكهربائية للحصول على أسرع ارسال ممكن عبر القناة المعتبرة ، وبشكل عملي ما هي السرعة التي نتمكن بواسطتها من إرسال رسالة معينة عبر قناة معطاة بدون اخطاء . هذا هو عرض تقريبي وعام للمسألة التي طرحها شانون على نفسه ثم قام بحلها .





الفصل الثالث

نموذج رياضي

إن النظرية الرياضية التي تحاول تفسير العالم والتنبؤ بأحداثه تعتبر على الدوام نموذجاً مبسطاً لهذا العالم لا تدخل في صلب تشكيله إلا الأشياء التي لها صلة بالظاهرة المدروسة .

وهكذا تتركب الكواكب من مواد مختلفة صلبة ، سائلة ، وغازية في ضغوط ودرجات حرارة متباينة . تعكس الاقسام من تلك المواد المعرضة لنور الشمس نسباً من الالوان المختلفة للضوء الساقط عليها وهذا يؤدي لملاحظتنا بقعاً لونية مختلفة عندما نقوم برصد تلك الكواكب . إلا" أن الفلكي الرياضي لا يحتاج كل ذلك عند حسابه لمدارات الكواكب حول الشمس وكل ما يأخذه بالاعتبار في هذه الحالة كتلتي الشمس والكوكب المعتبر وبعد الكوكب عن الشمس ، واخيراً سرعة الكوكب وجهة حركته عند لحظة ابتدائية معينة .. واذا رغب الفلكي بحساب اكثر دقة يدخل في حسابه كتل وحركات الكواكب التي تفرض اثراً ثقالياً على الكوكب المدروس .

لا يعني ذلك أن الفلكين غير معنيين بالأحوال الاخرى للكواكب وكذلك بالنجوم والسدم ، إلا" أن النقطة الجوهرية في الموضوع انهم لا يحتاجون هذه الأمور لدى حسابهم مدارات الكواكب . تبرز جماليات وقوة النظرية الرياضية والنموذج الرياضي في الفصل بين ما هو هام وما هو أقل أهمية ، وهكذا يمكن الربط بين بعض الظواهر الملاحظة دون الحاجة لفهم الطبيعة بكليتها والكون بمجمل سلوكه .

تختلف النماذج الرياضية بدرجات دقتهـــا او امكانات تطبيقها .
وهكذا يمكننا حساب مدارات الكواكب بدقـة عالية باعتبارها اجساما
صلبة ، على الرغم من أنه لا توجد اجسام صلبة في الواقع . ومن جهـة
اخرى لا يمكن فهم الحركة المديدة لقمر الارض إلاّ إذا اخذنا بالحسبان
حركة كتل المياه على سطح الأرض اي حوادث المد والجزر . لذا ففي
دراسة حركة القمر لا يمكن اعتبار الأرض جسماً صلباً .

ندرس وبشكل مماثل في نظرية الشبكات الخصائص الكهربائيـة
لتوصيلات المحرضات المثاليـة والمكثفات والمقاومـات والتي تتصف
بخصائص رياضية بسيطة معينة . اما المركبات الحقيقية المستخدمة
بشكل فعلي في الدارات المختلفة كالراديو والتلفزيون والهاتف وغيرها
فهي تقرب الى هـذا الحد او ذاك من المواصفات الرياضيـة للعناصر
المثالية المعتبرة في نظرية الشبكات وهي المحرضات ، المكثفات والمقاومات
ويختلف مقدار الفرق حسب الحالة ، اذ يكون ضئيلا ويمكن اهماله في
دارة ما ، بينما يجب أخذه بالاعتبار في دارة أخرى بمزيد من الحسابات
المعمقـة .

يمكن أن يكون النموذج الرياضي بالطبع تقريبياً ، وحتى تمثيلا غير
صحيح للحوادث في العالم الواقعي . لذا وقع رجال الاقتصاد الأوائل
الانانيون المدفوعون بحب الربح في مطب مجانبة النماذج الرياضية لأن
سلوك الاقتصاديين لم يكن مناسباً وكذلك كان فاشلا في تفسير العلاقات
الاقتصادية في العالم والناس الموجودين فيه .

لقد ضربنا مدارات الكواكب وسلوك الشبكات امثلة عن نظم مثالية
حتمية يمكن التنبؤ بسلوكها المستقبلي تماماً كما نتوقع من الآلات ، إذ
يمكن للفلكيين حساب مواقع الكواكب لآلاف مقبلة من السنين ، كذلك
تطلعنا نظرية الشبكات على كل السلوك اللاحق لشبكة كهربائية عند
اثارتها بإشارة كهربائية معينة .

تنسحب خاصة الحتمية حتى على الاقتصاديين ، اذ ان الاقتصادي سيحركه على الدوام دافع الربح . إلا انه اذا قامر مرة برمي احجار النرد ظناً منه انه المفضل عندها ، فسيصبح مستقبله الاقتصادي على كف عفريت ولا يمكن التنبؤ به فحتى احجار النرد قد تفقد تفضيلها وتتركه عندئذ في حالة خسارة كاملة .

يمكننا على الرغم من ذلك تصميم نماذج رياضية للحوادث العشوائية كسحب عدد ما ، ثلاثة مثلا ، من الكرات البيضاء او السوداء من علبة تحتوي على العدد نفسه من كلا النوعين . يطلعنا مثل هذا النموذج ، في واقع الامر ، على انه بعد عدد كاف من المحاولات تكون قد سحبنا كرات بيضاء وبشكل متتال لمدة تساوي ١/٨ الوقت ، ومزيج من كرتين بيضاوين واخرى سوداء لمدة ٣/٨ الوقت ، ومزيج آخر من كرتين سوداوين واخرى بيضاء لمدة ٣/٨ الوقت ، واخيراً كرات سوداء وبشكل مستمر خلال ١/٨ الوقت . يفيدنا هذا النموذج ايضا في معرفة درجات الانحرافات عن هذه الأرقام بعد عدد ما من عمليات السحب .

تؤكد الخبرة العملية ان السلوك الإنساني ليس حتمياً بالدرجة التي يسعى اليها الاقتصادي وهو في نفس الوقت ليس عشوائياً كرمي احجار النرد أو سحب الكرات من مزيج من الكرات السوداء والبيضاء . إلا انه يجب علينا ان نوضح أن نموذجاً حتمياً لن يذهب بنا بعيداً في تفسير مختلف ظواهر السلوك الإنساني كالاتصالات الإنسانية مثلا ، بينما يمكن للنموذج العشوائي أو الإحصائي فعل ذلك .

نعلم جميعاً أن جداول معدلات الوفيات المستخدمة من قبل شركات التأمين تعطي تنبوءات معقولة فيما يتعلق بنسبة الوفيات المقبلة في مجموعة تضم عدداً كبيراً من المسنين ، هذا على الرغم من صعوبة التنبؤ بموت شخص معين وهكذا يمكننا النموذج الإحصائي من فهم السلوك الإنساني بل وحتى من اجراء بعض التنبوءات الخاصة بذلك السلوك تماماً كما نتنبأ على المدى البعيد وبشكل وسطي بعدد المرات التي سنسحب بها ثلاثة كرات سوداء بمحض المصادفة من مزيج متساوٍ من الكرات البيضاء والسوداء .

قــد يعترض البعض بحجة ان جــداول معدلات الوفيــات تغطي التنبوءات الخاصة بمجموعات من الناس ولا تغطي التنبوءات الخاصـــة بالأفراد ، إلاّ ان الخبرة تعلمنا أن باستطاعتنا اجراء التنبوءات الخاصة بالأفراد على قدم المساواة مع التنبوءات الخاصة بالمجموعات . وهكذا إذا عددنا تواتر استخدام الحرف E في النصوص الإنكليزية نجد أن نسبة مرات وروده تساوي ١٣ ٪ بالمقارنة مع الاحرف الأخرى ، يقابل هذا الرقم في حالة الحرف W ٢ ٪ فقط . ولكننا نجــد ايضاً نفس نسب الورود للحرفين W , E في نص كتبه اي شخص من الأشخاص . يمكننا أن نتنبأ استناداً الى ذلك شيء من الثقة انه إذا كتب اي منـــا رسالة طويلة جــداً او كتاباً باللغة الإنكليزيـــة فسيتواتر الحرف E بنسبة ١٣ ٪ فيما كتبه .

لا يحد إمكان التنبؤ بسلوك ما حريتنا اكثر مما تحدها اية عــادة اخرى . لا يتوجب على أي منا اثناء الكتابة إيراد نفس النسب لكــل الأحرف كما يوردها شخص آخر . لقد خرج كثيرون من الأشخاص المتميزين عن النموذج الشائع . قام ويليام. ف. فرايدمان المشهور بدراســة الأمور المستعصية ومؤلف كتـــاب (حــل رموز شكسبير) بتزويدي بالأمثلة التالية :

كتب الشاعر الالماني غوتلوب بورمان (١٧٣٧ ــ ١٨٠٥) ١٣٠ بيت شعر تضمنت ٢٠٠٠٠ كلمة خلت جميعها من الحرف R وذهب هــذا الشـــاعر الى اكثر من ذلــك بحذفه الحرف R من كل الجمــل التي استعملها للحوار في حياته العادية خلال الـ ١٧ سنة الأخيرة من حياته .

نشر القاص البرتغالي الوتسو آلكالاهيرارا خمس قصص في لشبونة عام ١٦٤١ لم يستخدم فيها أحد الأحرف الصوتية . وقد أورد امثلــة مشـــابهة كل من الأشخاص التاليـــة اسماؤهم : فرانشيسكونا فاريت ريبـــيرا (١٦٥٩) ، فرنانــدو جاسينتودي زوريتاهارو (١٦٥٤) ، وامانويل لورانزو ليزارازو بريويزانا (١٦٥٤) .

نشر ارنست فنسنت رايت رواية من ٢٦٧ صفحة لم يستخدم فيها الحرف E مطلقا . ولئن كانت هذه الممارسات الإرادية تدل على عدم استحالة كسر سلاسل المألوف ، إلاّ اننا عندما نكتب فإنما نفضل الطريقة الاتباعية المتداولة ، وهكذا فعندما لا نرغب بالخروج عن طريقنا بهدف اثبات أن بالإمكان أن نفعل خلاف ما تقدم فإننا نورد الحرف E في كتاباتنا الإنكليزية بنسبة ١٣ ٪ تماماً بكل ما في آلة معينة من كفاءة أو كتطبيق قانون رياضي .

لا نستطيع الانتقال من هذه الفكرة الى الفكرة المعاكسة المتضمنة أن بإمكان الآلة التي تزرع فيها نفس العادات كتابة نصوص انكليزية إلاّ أن شانون أوضح كيفية تقريب الكلمات والنصوص الإنكليزية بعمليات رياضية يمكن تنفيذها من قبل آلة معينة .

نفرض على سبيل المثال أن كل ما نستطيع فعله هو انتاج سلاسل من الاحرف والفراغات باحتمالات متساوية . ويمكن تنفيذ ذلك على الصعيد العملي بكتابة كل حرف على نفس العدد من البطاقات المتماثلة وكذلك تخصيص عدد مماثل من البطاقات دون كتابة لتمثيل الفراغ ، واخيراً وضع الجميع في جعبة ثم سحب احداها واستخدام رمزها سواء اكان حرفاً أم فراغاً ثم اعادته فخلط البطاقات من اخرى وسحب واحدة لاستخدام رمزها وهكذا . ينتج عن هذا التطبيق ما يلي :

١ ــ التقريب الصفري (الرموز مستقلة ومتساوية الاحتمال)

XFOML RXKHRJFFJUJ ZLPWCFWKCYJ
FFJEYVKCSSGHYD QPAAMKBZAACIBZLHJQD

يتواتر هنا حرفا الـ Z و W بكثرة ، بينما عدد الفراغات قليل وكذلك عدد مرات ورود الحرف E . يمكننا ان نقترب أكثر من اللغة الانكليزية باختيار الاحرف بشكل مستقل عن بعضها البعض ولكن باختيار الحرف E مرات أكثر من اختيار الحرفين Z و W . وينفذ ذلك بزيادة عدد البطاقات الخاصة بالحرف E واقلال البطاقات الخاصة

بالحرفين W الحرف ومن ثم تكرار نفس الطريقة السابقة في استخراج البطاقات واستخدام رموزها . ولما كان احتمال ان يكون احد الاحرف E هو ١٣ر٠ نضع في الجعبة ١٣ بطاقة خاصة بهذا الحرف وبالمثل نضع بطاقتين فقط للحرف W لان الاحتمال المقابل للحرف الاخير هو ٢٠ر٠ وهكذا بالنسبة لبقية الاحرف . ندرج فيما يلي نتائج هذه التجربة والتي دعاها شانون بالتقريب الاول لنصوص اللغة الانكليزية .

٢ ـ التقريب الاول (الرموز مستقلة ولكن تساوي تواتراتها مايرد في النصوص الانكليزية) .

OCRO HLI RGWR NMIELWIS EU LL NBNESEBAYI TH
EEI ALHENHITTPA OOBTTVA NAH BRL

لا نجد في النصوص الانكليزية اي زوج من الاحرف يبدأ بالحرف Q الا الزوج QU ، وهكذا فاحتمال ان نصادف زوجاً مثل QX هو صفر وكذا احتمال مصادفة الزوج QZ وعلى الرغم من كون احتمال ورود الزوج QU اكبر من الصفر فهو احتمال صغير للغاية ، في حين ان احتمال الزوج OR هو ٣ر٧ ٪ والزوج TH ١ ٪ والزوج WE ٦ر٠ ٪ . تحمل هذه الاحتمالات المعنى التالي . اذا احتوى نص مكتوب على عدد من الاحرف مساوي مثلاً ١٠٠٠١ حرفاً فان في هذا النص ١٠٠٠٠ زوج متتال من الاحرف وهي : الحروف الاول والثاني ، الثاني والثالث ، الثالث والرابع ، وهكذا حتى الزوج المكون من الحرف ما قبل الاخير والحرف الاخير . نعتبر الزوج T H ونعد مرات وروده ؛ حيث يمكن أن يكون العدد الناتج (٣٧٠) . فاذا قسمنا عدد مرات ورود الزوج TH والذي فرضناه مساوياً ٣٧٠ على عدد كل الازواج الموجودة والمساوي في مثالنا ١٠٠٠٠ لحصلنا على عدد هو ٣ر٧ ٪ وهو احتمال أن نحصل على الزوج TH اذا رفعنا من ذلك النص وبشكل عشوائي زوجاً ما من الاحرف .

اعد بعض المحللين البارعين للشيفرات جداولاً تتضمن احتمالات

مماثلة لورود أزواج مختلفة من الاحرف في نصوص اللغة الانكليزية .
نفرض أن لدينا ٢٧ جعبة ، نخصص ٢٦ منها للازواج التي تبدأ بكل حرف من حروف اللغة الانكليزية ، بينما الجعبة الاخيرة نخصصها للازواج التي تبدأ بفراغات . نضع بعد ذلك عدداً كبيراً من الازواج في الجعب بشكل يناسب احتمالات تلك الازواج ، فمثلاً من أصل ١٠٠٠٠ (زوج ، نضع ٣٧ زوج من نوع TH ، ١٠ من نوع WE وهكذا .

دعونا نتوقف للحظة في محاولة فهم معنى هذه الجعب المليئة بالازواج بدلالة عمليات التعداد الاصلية التي أدت لتقويم احتمالات تلك الازواج .

يمكننا متابعة كل ورود للحرف T في النص اذا نحن جردناه حرفاً بحرف ، وهكذا سيكون عدد الازواج البادئة بالحرف T ، والتي نضعها جميعاً في جعبة واحدة ، مساوٍ لعدد مرات ورود الحرف T . وتساوي نسبة عدد هذه الازواج الى عدد كل الازواج الواردة في النص ، احتمال ورود الحرف T في النص أي ١٠ ٪ ، نرمز لهذا الاحتمال بالرمز :

ح (T) = ١٠ ٪

نلاحظ هنا ان هذه النسبة هي ايضاً نسبة الازواج المنتهية بالحرف T كما هي نسبة الازواج البادئة به .

وبالعودة الى نصنا المثال المحتوي على ١٠٠٠١ حرفاً و ١٠٠٠٠ زوجاً ، فان عدد مرات ورود الزوج TH هو ٣٧٠ ، وهكذا فاحتمال مصادفة الزوج TH هو ٣ر٧ ٪ ، نرمز لهذا الاحتمال بالرمز ح (H , T) ويكون : ح (H , T) = ٣ر٧ ٪

نجد حسب مثالنا ان الازواج البادئة بالحرف T والموضوعة في جعبة واحدة تساوي ١٠٠٠ زوج لان احتمالها هو ١٠ ٪ ، ومن أصل هذه الازواج يوجد ٣٧٠ زوج من نوع TH . وهكذا يكون نسبة الازواج TH مساوية لـ : $\frac{٣٧٠}{١٠٠٠}$ = ٣٧ ٪ نقول حسب ما تقدم أن احتمال كون الزوج البادىء بالحرف T (وهو الاحتمال الذي هو الزوج TH نرمز له بالرمز $ح_{T}$ (H)) يساوي : = ٣٧ ٪

يدعى هذا بالاحتمال المشروط بكون الحرف التالي للحـرف T هو الحرف H .

يمكننا ان نستخدم هذه الاحتمالات المثلة بشكل كاف بعدد الازواج المختلفة في الجعب المختلفة لانشـاء نص انكليزي تتواتر فيـه الاحرف والازواج تواترها في النصوص الطبيعية . نبين فيما يلي طريقة انشاء هذا النص : نسحب من جعبة ما زوجاً ونكتب حرفيه ثم نسحب زوجاً آخر من الجعبة المخصصة للازواج البادئة بالحرف الثاني من الزوج الاول المسحوب ونكتب الحرف الثاني من هذا الزوج الثاني المسحوب . نسحب الآن زوجاً ثالثاً من الجعبة المخصصة للازواج البادئة بالحرف الثاني من الزوج الثاني المسحوب ونكتب الحرف الثاني من هذا الزوج الثالث المسحوب ، ونستمر بهذه العملية وفق نفس الوتيرة ، كما نعامل الفـراغ كالحرف تماماً . هناك احتمال خاص ان يلي الفراغ أحد الاحرف (انهاء كلمة ما) وكذا احتمال خاص آخر أن يلي احد الاحرف فراغ ما (بدء كلمة مـا) .

انشأ شانـون مادعاه بالتقريب الثانـي للنصوص الانكليزية لـدى هذه الطريقة .

٣ ـ التقريب الثاني (انشاء الازواج كما في النصوص الطبيعـة الانكليزية)

ON IE ANTSOUTINYS ARE T INCTORE ST BE S
DEAMY ACHIN D ILONASIVE TUCOOWE AT
TEASONARE FUSO TIZIN ADY TOBE
SEACE CTISBE

ابدع بعض الباحثين فكرة استقصاء ورود التراكيب الثلاثية الاحرف وحسبوا بالمثل احتمالاتها . استخدم شانون هذه الاحتمالات ايضـاً لانشاء مادعاه بالتقريب الثالث للنصوص الانكليزية .

٤ ـ التقريب الثالث (انشاء التراكيب الثلاثية كما في النصوص الطبيعية الانكليزية)

IN NO IST LAT WHEY CRATICT FROURE BIRS GROCID PONDENOME OF DEMONSTURES OF THE REPTAGIN IS REGOACTIONA OF CRE

نلاحظ لدى العودة الى تقريبات شانون الاربعة أعلاه تشابهاً مطرداً مع النصوص الانكليزية الطبيعية . لا نجد في التقريب الاول وهو التقريب الذي يأخذ تواترات الاحرف بعين اعتبار ، التراكيبين OCRO و NAH وهما يشبهان نوعاً ما الكلمات الانكليزية . ولدى الانتقال الى التقريب الثاني الذي يأخذ تواترات الازواج بعين الاعتبار نجد أن كل التراكيب فيه يمكن نطقها ، كما أن التراكيب ANDY AT BE ARE ON ترد في اللغة الانكليزية . واخيراً في التقريب الثالث الذي يعتبر تواتر ورود التراكيب الثلاثية نجد ثمانية كلمات من اللغة الانكليزية ؛ وعدة كلمات اخرى يطابق منطوقها منطوق الكلمات الانكليزية مثل :

DEMONSTURES PONDENOME GROCID

قام ج. ت. جيلبود بعمل مشابه ولكن في اللغة اللاتينية بدلاً من الانكليزية واستخدم التراكيب الثلاثية وتوصل الى نتائج مماثلة نقتطف منها التراكيب التالية :

IBUS CENT IPITIA VETIS IPSE CUM VIVIVS SE ACETITI DEDENTUR

ونجد من بين هذه التراكيب الكلمات اللاتينية الاصلية التالية :

IPSE CUM SE

يتضح من هذه الامثلة اننا اذا اعطينا الآلة احصائيات حول لغة معينة وكذلك احتمالات ايجاد حرف معين أو زمر مؤلفة من حرف أو اثنين

او ثلاثة او اكثر ، باعطاء الآلة ايضاً امكانية شبيهة بسحب كرة من جعبة او قذف قطعة نقد او اختيار رقم عشوائي فيمكننا جعل الآلة تنتج نصوصاً اكثر قرباً من النصوص الطبيعية للغة المعتبرة . وكلما كانت المعلومات المعطاة للآلة اكثر كمالاً كانت النصوص المصاغة من قبلها شبيهة بالنصوص الطبيعية سواء بمبناها الاحصائي او بالنسبة للعين الانسانية .

اذا جعلنا الآلة تختار زمراً من ثلاثة احرف بالاستناد الى احتمالاتها فان اي تركيب ثلاثي تقدمه الآلة سيكون كلمة معروفة من اللغة او جزءاً من كلمة معروفة واي تركيب مثنى تقدمه في هذه الحالة سيكون كلمة معروفة ان الآلة على كل حال اكثر انطلاقاً من الانسان الذي يحدد نفسه عادة بكتابة سلاسل من الاحرف منتقاة بحيث تحمل معاني معينة وهكذا يتجاوز الكثير من التركيبات التي اوردناها في التقريبات السابقة . يمكن بالطبع للانسان ومن حيث المبدأ ان يكتب مثل هذه التراكيب الا انه لا يفعل ذلك عادة .

يمكننا تحرير الآلة من عيب تقديم تراكيب الاحرف غير المعروفة في اللغة بجعلها ، اي الآلة ، تختار من بين التراكيب التي يحتوي كل منها على عدد من الاحرف يساوي ما تحويه اطول كلمة معروفة في اللغة . نستطيع تحقيق الهدف ذاته بطريقة ابسط اذا جهزنا الآلة بالكلمات عوضاً عن الاحرف وتراكيبها ثم طلبنا منها تقديم الكلمات وفق احتمالات مناسبة .

قدم شانون مثالاً تم اختيار الكلمات فيه بشكل مستقل ولكن بحسب احتمالات ورودها في النصوص الانكليزية ، مثلا ترد كلمات THE AND MAN وغيرها بنفس تواتر ورودها في النصوص الطبيعية انكليزية . ولتحقيق هذا المثال نختار نصاً ما ، ثم نكتب كل كلمة واردة فيه وبشكل منفصل على بطاقة ، نضع البطاقات في جعبة ونخلطها ثم نبدأ بسحب البطاقات واحدة تلو الاخرى ونكتب الكلمات المقابلة وفق ترتيب السحب . يسمي شانون هذه العملية بتقريب الكلمات الاول . وقد حصل في مثال عالجه على ما يلي :

٥ ــ تقريب الكلمات الاول : تسحب الكلمات هنا بشكل مستقل ولكن وفق تواتراتها المناسبة .

REPRESENTING AND SPEEDILY IS AN GOOD APT OR CAN COME DIFFERENT NATURAL HERE HE THE A IN CAME THE TO OF TO EXPERT GRAY COME TO FURNISHES THE LINE MESSAGE HAD BE THYESE

لا توجد جداول لاحتمالات ورود أزواج الكلمات في اللغة الانكليزية ، الا أن شانون انشأ مقطعاً عشوائياً كانت فيه احتمالات ورود ازواج الكلمات مساوية لما يمكن أن تكون عليه في مقطع طبيعي . بدأ شانون باختيار زوج من الكلمات من رواية معينة وبشكل عشوائي ، ثم نسخ الكلمة الثابتة من هذا الزوج على ورقة منفصلة . بحث بعد ذلك في نفس الرواية عن الورود التالي للكلمة الثانية من الزوج الاول ، ونسخ الكلمة الواقعة بعد هذا الورود على الورقة المنفصلة ، ثم بحث عن الورود التالي لهذه الكلمة الاخيرة ونسخ الكلمة التالية لهذا الورود وهكذا . ادت هذه العملية بشانون الى ما أسماه تقريب الكلمات الثاني .

٦ ــ تقريب الكلمات الثاني : حيث احتمالات تتالي الكلمات صحيحة ولا تستخدم قواعد الانشاء أبعد من ذلك .

دعونا نمعن النظر في كل ما وجدناه . تــرد في النصوص اللغويــة

THE HEAD AND IN FRONTAL ATTACK ON AN ENGLISH WRITER THAT THE CHARACTER OF THIS POINT IS THEREFORE ANOTHER METHOD FOR THE LETTERS THAT THE TIME OF WHO EVER TOLD THE PROBLEM FOR AN UNEXPECTED.

نلاحظ في هذا النص تشكيلات من الكلمات الانكليزية تشابه ، بــل وقد تطابق أحياناً ، ما يرد في نص طبيعي .

دعونا نمعن النظر في كل ما وجدناه . ترد في النصوص اللغوية الحقيقية ، تلك النصوص التي نرسلها عبر لوحة جهاز البرق مثلاً ، حروف معينة بتواترات ثابتة تقريباً . تتكرر تراكيب الاحرف الثنائية والثلاثية والرباعية بتواترات ثابتة تقريباً أيضاً خاصة كلما ازداد طول النص المعتبر . كذا ترد الكلمات وأزواج الكلمات بتواترات ثابتة . وأخيراً يمكننا انتاج سلاسل من الكلمات أو الاحرف تعكس هذه المواصفات الاحصائية اذا جعلنا — آلة مثلاً — تتصدى للامر باستخدام طرائق رياضية عشوائية .

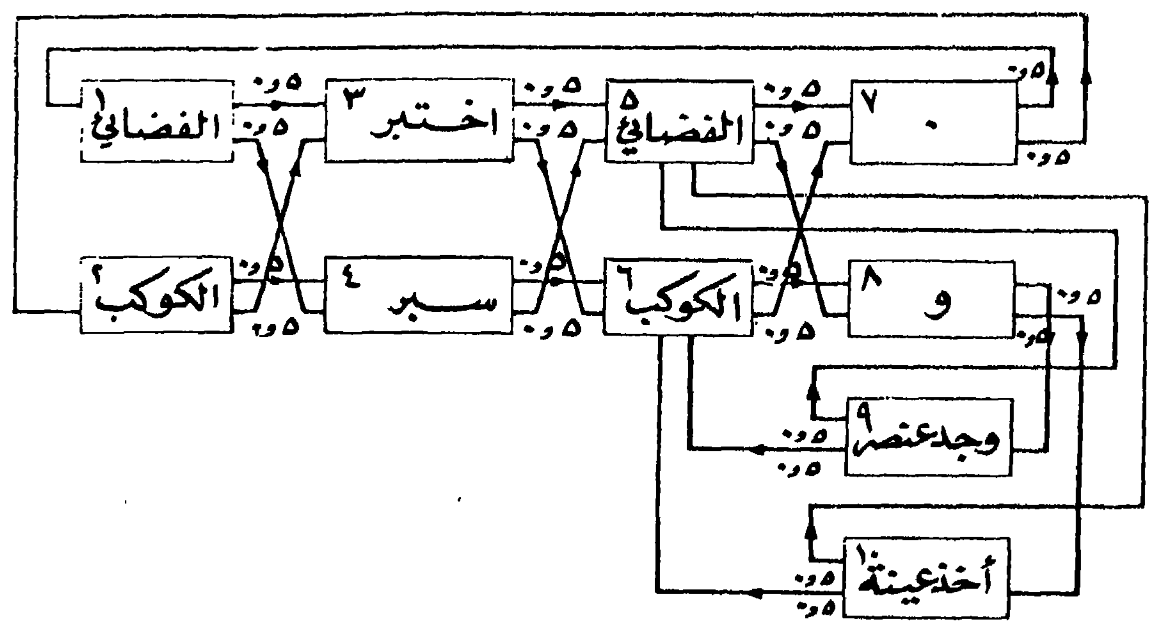
لن تستطيع هذه الطريقة ، مهما طرأ عليها من تحسينات ، أن تنتج كل سلاسل الكلمات التي يمكن للانسان ان يتفوه بها ؛ وانْ دفعها حتى نهايتها القصوى لن يخرج بها عن تراكيب جملية وردت سابقا والاّ لما حملت المعلومات الاحصائية التي قامت عليها أصلاً . ومع ذلك فقد تتشكل جملة لم تقل أبداً من قبل .

لا تقتصر أحكام اللغة على الاحرف والكلمات فقط ، بل تتعداها الى اصناف من الكلمات وقواعد ربطها ، اي الى قواعد اللغة . يتوجب في هذا المعرض على اللغويين والمهندسين الذين يحاولون بناء آلات مترجمة ان يغوصوا في القواعد ، بحيث تتمكن آلاتهم من (توليف الكلمات في تشكيلات صحيحة من وجهة نظر القواعد ، حتى ولو لم ترد هذه التشكيلات في النصوص اللغوية سابقا (وعلى الآلات أيضا ان تتفهم معاني الكلمات الواردة في النص المترجم من سياق ذلك النص) . ان هذه مشكلة كبيرة ومعقدة جدا . إما تحقيق آلة قادرة على انتاج تشكيلات لا نهاية لعددها من الجمل الصحيحة بالنسبة للقواعد ، ولكن غير المفيدة في اكثر الاحوال ، فهو امر بسيط فعلا .

يوضح الشكل ٣ — ١ آلة من هذا الطراز . يمثل كل مستطيل مرقم حالة من حالات هذه الآلة . تدعى هذه الآلة بالآلة منتهية الحالات ، لان عدد مستطيلاتها أو حالاتها منته .

ينطلق من كل مستطيل عدد من الاسهم الى المستطيلات الاخرى ، يساوي هذا العدد في آلتنا الخاصة هذه اثنين ، اذ ينطلق سهمان فقط من كل مستطيل الى مستطيلين آخريين . كذلك فقد تم ان فاق كل سهم في هذه الآلة بالعدد ½ ويعني هذا العدد ن احتمال انتقال الآلة مثلا من الحالة ٢ الى ٣ هو ½ ، كذلك احتمال انتقالها من الحالة ٢ الى الحالة ٤ هو ½ ايضــا .

كيف نشغل هذه الآلة ؟ الامر بسيط فكل ما نحتاجه هو سلسلة من الخيارات العشوائية والتي يمكن الحصول عليها مثلا برمي قطعة نقد (مرة بعد مرة ، ونصطلح على ان (الطرة) تعني اتباع السهم العلوي بينما (النقش) يعني اتباع السهم السفلي ويفضي كل من السهمين الى حالة جديدة من حالات الآلة .. وعندما نبلغ حالة جديدة للآلة تنسخ الكلمة او الكلمات او الرموز الوارد في المستطيل المحدد ثم (نرمي قطعة النقد مرة اخرى بهدف الانتقال الى حالة جديدة وهكذا .



الشكل ٣ ـ ١

اذا بدانا على سبيل المثال في المستطيل ٧ وحصلنا بالقذف المتتالي لقطعة النقد على المتتالية : نقش ـ طرة ـ طرة ـ طرة ـ نقش ـ نقش ـ طرة ـ نقش ـ نقش ـ نقش ـ طرة ـ طرة ـ طرة ـ طرة ـ ، لانتهينا الى النص التالي :

الكوكب سبر الكوكب واخذ عينة الكوكب واخذ عينة الكوكب . الفضائي اختبر الفضائي .

يمكن لهذه العملية ان تستمر دون توقف منتجة جملا غير محدودة بالطول . يفضي الانتقاء العشوائي باستخدام جداول احتمالات خاصة بسلاسل من الرموز (حروف وفراغات) او الكلمات الى تراكيب مشابهة النصوص اللغوية ، كذلك تصل الى نفس النتيجة آلة متناهية الحالات مزودة بخيار عشوائي يمررها من حالة لاخرى . تسمى كلا العمليتين عملية عشوائية نظرا لانطوائها على عنصر العشوائية .

لقد تفحصنا عددا من خصائص اللغة الانكليزية وتبين لنا ان متوسط تواتر الحرف B ثابت تقريبا في نص ما لكاتب معين ونصوص مغايرة لكتاب آخرين ، كذلك سحبنا بثبات التواترات على التراكيب الاعقد كازواج الاحرف . واخيرا تراكيب اشبه بالنصوص اللغوية باستخدام سلاسل من الخيارات العشوائية كسحب بطاقة من جعبة و قذف قطعة نقد وبلحظ الاحتمالات المناسبة اثناء العملية . وكانت احدى هذه الطرق استخدام الآلة المتناهية الحالات كتلك الموضحة في الشكل ٣ ـ ١ .

انصبت مساعينا على بناء نموذج رياضي يمثل مصدرا للنصوص اللغوية توجب على هذا النموذج انتاج تراكيب اقل ما يمكن للنصوص اللغوية الطبيعية وكانت من القرب بدرجة جعلت مسالة ترميزها وارسالها مطابقة لحالة ترميز وارسال النص الفعلي ، كما توجب ان تعرف الخصائص الرياضية للنموذج بشكل يمكن من اثبات نظريات مفيدة تتعلق بترميز وارسال النصوص التي يقدمها ، وهي نفس الوقت قابلة التطبيق الى درجة مقبولة من التعريب في حالة النصوص الفعلية . ولعلها مبالغة ان نتصور ان انشاء النصوص اللغوية الفعلية يتلائم والدقة الرياضية من خلال عمل النموذج .

اعتمد شانون المصدر المستقر كنموذج رياضي لتمثيل انتاج النصوص (وكذلك الرسائل المنطوقة والمرئية) . ولا بد لتفهم المصدر المستقر من دراسة المصدر الساكن اولا ، وهذه هي مهمتنا التالية .

يعكس مصطلح المصدر الساكن الفكرة العامة وراء هذا المصدر فلنتصور آلة تخيلية تنتج على الدوام بعد اقلاعها سلسلة الاحرف :

آ ب آ ب آ ب .... الخ

فيتضح أن ماسيلي من النتاج هذه الآلة يطابق ما سبق لذا فانسب صفة يمكن ربطها بمصدر هذه الاحرف هي صفة السكون . يمكن ان نقابل المصدر السكوني هذا بمصدر آخر يقدم بعد اقلاعه سلسلة الاحرف:

آ ب آآ ب ب آآآ ببب .... الخ

يزداد هنا وعلى الدوام طول السلاسل الجزئية المكونة من حرفي آ ، ب ، لذا فالمصدر هنا ليس سكونيا على الاطلاق .

ان أي سلسلة من الاحرف يتم اختيارها بشكل عشوائي ووفق احتمالات محددة تشكل مصدرا ساكنا . سبق ان قدمت التقريبات في الامثلة ۱ ، ۲ ، ۳ امثلة عن المصادر الساكنة لقد غدت الفكرة العامة للمصدر الساكن واضحة بما فيه الكفاية الآن . اما التعريف الرياضي الدقيق ففيه قليل من الصعوبة .

تتطلب فكرة سكونية المصدر عدم التغير مع الزمن . ولكن اذا اعتبرنا مصدراً لازواج الاحرف يتوقف فيه احتمال الحرف الثاني على الحرف الاول . وبدأنا من الحرف A فان حرفا مختلفة متعددة قد تتالى بينما اذا بدأنا من الحرف Q فان الحرف التالي سيكون قطعا U . وبصورة عامة فان نمط انطلاق المصدر سيؤثر على البنية الاحصائية لسلسلة الاحرف المنتجة ، على الاقل لعدد غير ضئيل من عناصر هذه السلسلة .

يقترح الرياضي ، بهدف الالتفاف حول هذه النقطة ، اعتبار اكثر من سلسلة من الاحرف يمكن للمصدر انتاجها . فآلتنا في كل الاحوال آلة تخيلية ، لذا نستطيع ان نتخيل وبمنتهى البساطة انها اقلعت عددا غير منته من المرات منتجة بذلك عدد غير منته من سلاسل الاحرف . يسمى هذا العدد الغير منتهى من السلاسل بمجموعة السلاسل .

نستطيع بدء هذه السلاسل باي طريقة نشاء ، فمثلا في حالة مصدر لازواج الاحرف ، يمكننا اذا شئنا بدء (نسبة من السلاسل قدرها ١٣٪ بحرف E (هذا حو احتمال ورود الحرف E في النصوص الانكليزية) ، وبدء نسبة اخرى من السلاسل نسبتها ٢٪ بحرف W (احتمال الحرف W) وهكذا . اذا نفذنا ذلك وحسبنا متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف E في مطلع كل منها (وهو ١٣٪ بالطبع) وكذلك متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف Z في الموقع الثالث من كل منها وهكذا ، لوجدنا ان هذا المتوسط سيساوي على الدوام ١٣٪ ينطبق هذا الامر على اي موقع تختاره في السلسلة وعلى اي حرف آخر غير حرف E ، اذ سيكون على الدوام متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف المعتبر فيها في موقع معين مساويا لاحتمال ذلك الحرف . ينسحب هذا ايضا على الازواج ، فمتوسط عدد السلاسل التي يرد فيها زوج مثل TH او WE في موقع معين من كل سلسلة لا علاقة له بالموقع المعتبر .

هذا ما نعنيه بمصطلح السكونية اذا ربطنا احتمالات معينة بشروط البدء الخاصة بانشاء مجموعة من سلاسل الاحرف التي يقدمها مصدر توليد للاحرف واذا قمنا بعد ذلك باجراء اية عملية احصائية عند موقع معين من كل سلسلة وكانت متوسطات الاحتمالات المحسوبة بالاستناد الى هذه العملية مستقلة عن الموقع الذي جرت عنده العملية الاحصائية ، كان المصدر في هذه الحالة سكونيا . يبدو هذا التعريف غامضا او صعبا بالنسبة للقارىء ، الا ان الصعوبة تبرز عند محاولة اعطاء شكل رياضي دقيق ومفيد لفكرة قد تظهر من جهة اخرى عديمة الفائدة رياضيا .

اعتبرنا في مناقشاتنا السابقة لدى دراستنا مجموعة السلاسل الغير منتهية التي يولدها مصدر معين ، المتوسطات عبر كل الاحرف الواردة في الموقع الاول من كل سلسلة ثم عبر كل الاحرف الواردة في الموقع الثاني من كل سلسلة ثم في الموقع الثالث وهكذا وكررنا العمل بعد ذلك بحساب المتوسطات عبر كل الثنائيات الواردة في مواقع مناظرة ثم الثلاثيات وهكذا تباعا . يدعى المتوسط المترتب على مثل هذه الحسابات بمتوسط المجموعة وهو يختلف عن متوسط آخر كنا قد تعرضنا له سابقا في هذا الفصل حيث قمنا بخلط كل الاحرف الواردة في سلسلة واحدة فقط واخذنا المتوسط عبر هذا الخليط ، يدعى مثل هذا المتوسط الاخير بالمتوسط الزمني .

يمكن للمتوسطين الآنفي الذكر ان يكونا مختلفين . نفرض على سبيل المثال مصدرا يعطي في ثلث عدد مرات اقلاعه الحرف A ويصدر بعد كل من هذه الاقلاعات الحرفين A B بالتناوب وفي الثلث الثاني يعطي الحرف B ثم الحرفين B A بالتناوب ، اما في الثلث الثالث فلا يعطي الا الحرف A . تكون السلاسل الممكنة وفق ذلك :

A B A B A B ....

B A B A B A ....

E E E E E E E ....

يتضح بشكل مباشر ان هذا المصدر سكوني ونـدرج في الجدول التالي الاحتمالات الخاصة به .

احتمال الحرف	المتوسط الزمني السلسلة الاولى	المتوسط الزمني السلسلة الثانية	المتوسط الزمني السلسلة الثالثة	متوسط المجموعة
A	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	٠	$\frac{1}{3}$
B	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	٠	$\frac{1}{3}$
E	٠	٠	١	$\frac{1}{3}$

اذا كان المصدر ساكناً وكان كل متوسط مجموعي ممكن (للاحرف ، الأزواج ، الثلاثيات وغيرها) مساويا للمتوسط الزمني المقابل ، دعي المصدر في هذه الحالة مصدرا مستقرا . تنطبق النظريات البرهنة في الفصول المقبلة والمتعلقة بنظرية المعلومات على المصادر المستقرة وتستند براهينها الى افتراض ان مصدر الارسال هو مصدر مستقر . لقد جرى تقدم لا بأس به في مجال ترميز المصادر غير الساكنة الا اننا لن نتعرض لها في هذا الكتاب .

تتناول نظرية المعلومات المصادر المنعزلة التي تولد سلاسل من الاحرف وقد عرضنا لها للتو ، والى جانب ذلك تعنى نظرية المعلومات بالمصادر المستمرة التي تصدر اشارات متغيرة مستمرة كأمواج التخاطب الصوتية او التيارات الكهربائية المتغيرة المستخدمة في الهاتف . ان هذه المصادر هي من النوع المستقر .

لماذا يشكل المصدر المستقر نموذجاً رياضياً ملائماً ومثمراً لدى تطبيقه؟ ان لم يكن لسبب فلاننا نرى بالعودة الى تعريف المصدر المستقر . ان الاحصائيات الخاصة برسالة مثلا تبرز تواتر حرف معين كالحرف E او زوج مثل TH او تركيب ثلاثي او غيره ، كل هذه الاحصائيات لا تتغير على طول الرسالة ، وكلما ذهبنا أبعد بالرسالة نحصل على تقديرات اجود لاحتمالات ورود الاحرف المختلفة وزمرها . وبكلمات اوضح : اذا اختبرنا مقاطع اطول واطول من الرسالة نتوصل وعلى الدوام لتوصيف رياضي للمصدر أجود وأجود .

ان الاحتمالات وتوصيف المصدر التي نحصل عليها وفق ما تقدم تنطبق على كل الرسائل التي يولدها المصدر وليس على الرسالة المختبرة فقط ، وسبب ذلك هو تساوي متوسط المجموعة والمتوسط الزمني ..

وهكذا فالمصدر المستقر هو نوع خاص وبسيط من مصادر الرسائل الاحتمالية او العشوائية ، والعمليات البسيطة اسهل من منظور التناول

الرياضي بالمقارنة مع نظائرها المعقدة . الا ان البساطة بحد ذاتها لا تكفي فالمصدر المستقر لا يمكن ان يكون موضع اهتمام في نظرية الاتصالات اذا لم يكن واقعياً بدرجة كافية الى جانب بساطته .

يتضح في نظرية الاتصالات جانبين ، يتصف الاول بالدقة الرياضية البالغة ويعالج المصادر المستقرة الافتراضية والتي نتخيل ان بامكانها اصدار مجموعات لا نهاية لها من سلاسل تحتوي كل منها على عدد لا نهاية له من الرموز . ولنا حرية الخيار كاملة فيما يتعلق اما بدارسة المصدر بحد ذاته أو اختبار المجموعات اللانهائية من الرسائل التي بامكانه أن يولدها .

نستخدم النظريات المدرجة في نظرية الاتصالات لتغطية المشاكل المتعلقة بارسال النصوص اللغوية الحقيقية . ليس الكائن الانساني آلة رياضية افتراضية فهو لا يستطيع انتاج حتى سلسلة واحدة لا نهائية من الاحرف ناهيك عن عدد لا نهاية له من المجموعات تحتوي كل منها على عدد لا نهاية له من هذه السلاسل .

الا أن الانسان لا يستطيع انتاج سلاسل بالغة الطول من الاحرف ، ويقدم كل الكتاب مجموعات كبيرة من هذه السلاسل الطويلة . يشكل جزء من هذا الخرج الهائل من السلاسل البالغة الطول الرسائل التي ترسل فعلا عبر لوحة البرق .

وهكذا سنفترض ان مجموع كل الذين يبرقون هو بحد ذاته مصدر مستقر للرسائل البرقية ، وكذا مجموع كل الذين يتخاطبون عبر الهاتف هو مصدر مستقر للاشارات الهاتفية . ان مثل هذه الافتراضات تقريبية بدرجة كافية وهي قابلة للتطبيق لدى من يتكلمون لغة واحدة ، اذ لا يمكن ان نعتبر كمصدر مستقر مجموع من يستخدمون اللغتين العربية والانكليزية فالخرج المرتبط بكل من هاتين الفئتين له احتمالاته وحساباته الاحصائية الخاصة وهي تختلف بشكل جذري عن احتمالات وحسابات الفئة الاخرى

لا يمكننا ان نؤكد أن مجموع الكتّاب هو مصدر مستقر للرسائل وفق المعنى الدقيق لهذا المصطلح . اذ تختلف الاحصائيات اللغوية نوعاً ما باختلاف موضوع النصوص وهدفها ، كما ان اسلوب الانشاء يختلف من شخص لآخر .

نلاحظ ما يشابه ذلك في حالة التخاطب عبر الهاتف فبعض الناس يتحدثون بنعومة وبعضهم بخشونة ، بينما يقتصر البعض الآخر على اللهجة الخشنة في حالة الغضب فقط . وكل ما نستطيع تاكيده في هذه المجالات اننا تجانسا ملحوظا في احصائيات الرسائل كحالة احتمال ورود الحرف e في عينات مختلفة من النصوص الانكليزية .

يجب ان نتذكر على الدوام ألفارق الهام بين المصدر المستقر النظري وفق النظرية الرياضية للاتصالات ومصدر الرسائل المستقر التقريبي في العالم الواقعي لذا علينا أن نفرض تحفظات معقولة لدى تطبيقنا خلاصة النظرية الرياضية للاتصالات على المسائل العملية . ولا شك ان كلاً منا قد تعود ذلك في مجالات اخرى ، فمثلا تؤكد لنا الرياضيات أن بامكاننا تحديد مركز الدائرة بدقة اذا اعطينا ثلاثة نقاط منها ، الا انه لا يوجد انسان عاقل يفكر بامكان تحديد مركز دائرة مرسومة للتو على قطعة من الورق وفاقدة بعض معالمها بان يلجا مثلا الى ثلاثة نقاط على محيط هذه الدائرة تبعد عن بعضها البعض باقل من جزء من الف جزء من السنتيمتر وكل ما يمكن أن يفعله في هذه الحالة هو استخدام بداهته للحصول على تحديد امثل لموقع المركز ومن ثم قياس البعد بين هذا المركز ونقطة واضحة من محيط الدائرة . اوردنا هذا المثال لتبيان نوع الحكم والتحفظ الذي يستخدم عادة عند تطبيق نظرية رياضية دقيقة على حالة عملية .

ومهما كان من أمر تحفظاتنا فان تساؤلات فلسفية تطرح نفسها سيما وأننا قد استخدمنا نموذجا رياضيا احتماليا عشوائيا لتمثيل الانسان كمصدر للرسائل . هل يعني ما فعلناه أن الانسان يتصرف بشكل عشوائي ، ان الامر ليس بهذه البساطة ، وربما لو استطعنا معرفة المزيد

عن الانسان ومحيطه وتاريخه لتمكنا على الدوام من التنبؤ بالكلمة التالية التي سينطقها او سيكتبها انسان معين .

نفرض في نظرية الاتصالات اننا نحصل معرفتنا عن مصدر الارسال اما من الرسائل التي يولدها هذا المصدر او ربما من دراسة غير متكاملة للانسان بحد ذاته . وبالاستناد الى ذلك يمكن أن نظفر ببعض المعلومات الاحصائية التي تساعد في زيادة احتمال معرفة ما يمكن ان تكون عليه الكلمة التالية من رسالة معينة . يبقى هناك عنصرا من الريبة . يتصرف مصدر الرسائل بالنسبة لنا كما لو أن خيارات معينة كانت تجري بشكل عشوائي ذلك لاننا لا نملك معرفة كاملة بهذا المصدر وهكذا لا يمكننا التنبؤ عما ستكون عليه هذه الخيارات . ولو كان بامكاننا التنبؤ بها اذن لوظفنا معارفنا لسبر غور المعلومات الاحصائية الخاصة بالمصدر . ولو استطعنا تحصيل كم أكبر من المعلومات لكان من الممكن ان نضع يدنا على حقيقة أن تلك الخيارات ليست عشوائية في واقعها بمعنى انه يمكن التنبؤ بها (وذلك بالاستناد الى المعلومات التي ليست بحوزتنا) .

نستنتج الآن ان ما عرفناه عن الآلات المتناهية الحالات كتلك في الشكل ٣ ــ ١ كان محدودا فعلا ، فلتلك الآلات دخلها وخرجها ، والانتقال من احدى حالاتها الى حالة اخرى لا يجب وبالضرورة ان يتم من خلال خيار عشوائي ، اذ أن مثل هذا الانتقال قد يقرر أو على الاقل يتأثر بمختلف اشكال الدخل لتلك الالة . وعلى سبيل المثال ، يتقرر عمل الحاسب الالكتروني ، وهو آلة متناهية الحالات ، بالبرنامج والمعلومات التي يغذيه بها المبرمج .

يبدو أمراً طبيعياً أن نفترض الانسان على انه آلة متناهية الحالات ليس فقط بسبب كونه مصدرا للرسائل يولد الكلمات ، بل في كل جوانب سلوكه الاخرى . نستطيع ان نتصور اذا شئنا ان كل حالات وتشكيلات الخلايا العصبية انما هي حالات الالة موضوع البحث (حالات الدماغ ، ربما) . واذا ذهبنا ابعد من ذلك فتصورنا الانتقال من حالة

لاخرى ، احيانا عن طريق اصدار كلمة ، حرف ، أو صوت أو جزء من صوت ، وفي احيان اخرى عن طريق القيام بفعل ما او جزء من فعل . وهكذا يكون النظر والسمع واللمس وغيرها من الحواس اشكال مختلفة للدخل تقرر او تؤثر في الحالة التالية التي ستنتقل اليها الآلة . اذا كان الانسان آلة متناهية الحالات فعلا ، فعدد حالاته سيتجاوز وبشكل خيالي اي امكانية للاحاطة الرياضية بها . الا أن تشكيلات جزيئات الغازات تشابه هذا الوضع الى حد كبير ، ورغم ذلك نستطيع رصد تصرفات الغاز بمعرفة ضغطه وحرارته فقط .

هل سنتمكن في احد الايام من معرفة العوامل الهامة التي تكمن وراء عمل الدماغ في اصداره للنصوص المكتوبة وباقي النشاطات على حد سواء؟ كما راينا ، نستطيع التنبؤ وبشكل جيد عن البنية الاحصائية للنص الذي قد يقدم انسان ما على كتابته ، الا اذا عمد الانسان المعني للتصرف بشكل مخالف ، وعلى الرغم من ذلك فسيفشل في مجانبة عاداته بشكل كامل .

ليست هذه الاعتبارات العامة ، بالطبع ، الهدف الحقيقي لهذا الفصل . فقد انطلقنا للبحث عن نموذج رياضي يكفي لتمثيل الجوانب المختلفة من الكائن الانساني المتعلقة بدوره كمصدر للرسائل ويكفي أيضا لتمثيل النقاط البارزة في الرسائل التي يصدرها . وراينا باخذ النصوص الانكليزية كمثال ان تواترات ورود كل الاحرف ثابتة بشكل ملفت للنظر الا اذا رغب الكاتب ان يتحاشى بعض الاحرف بشكل متعمد . وبالمثل فتواترات ورود ازواج وثلاثيات الاحرف والزمر الاعلى ايضا بما فيها الكلمات ، هي ثابتة بدورها .

ورأينا أيضا كيفية توليد سلاسل من الاحرف بتواترات تقابل ما يرد في النصوص الانكليزية باستخدام عمليات عشوائية احتمالية مختلفة كنقل كلمات أو احرف نص ما على بطاقات منفصلة ، ثم خلط البطاقات وسحبها بعد ذلك واحدة تلو الاخرى واستخدام ما يرد في كل واحدة لتكوين السلسلة المبتغاة . تستطيع العمليات العشوائية الاكثر تقدما كتلك التي تنفذها الآلات المتناهية الحالات ، ان تنتج تقريب اكبر للنصوص الطبيعية الانكليزيـة .

وهكذا يمكننا اعتبار العملية العشوائية المعممة كنموذج لمصدر رسائل كمثل مصدر يولد النصوص الانكليزية . ولكن كيف نستطيع تعريف أو تحديد العمليات العشوائية رياضياً بحيث نتمكن من اثبات النظريات الضرورية لترميز الرسائل المولدة من قبل المصدر ؟ يجب بالطبع ان نختار التعريف بحيث يأتي متسقاً مع خصائص النصوص الانكليزية الفعلية .

ان المصدر المستقر هو صنف المصدر العشوائي الذي يتم اختياره كنموذج لمصدر الرسائل الفعلي . ويمكن النظر للمصدر المستقر كحالة افتراضية تنتج عدداً لا نهاية له من مجموعات تحوي كل منها عددا لا نهاية له من سلاسل من الاحرف لا نهائية . يمكننا القول وبشكل مقبول أن الاحصائيات المرتبطة بسلاسل الاحرف أو الرسائل التي ينتجها مصدر مستقر لا تتغير مع الوقت ، فالمصدر اذن متوازن فعلا . وأكثر من ذلك ، ففي حالة المصدر المستقر تنطبق الاحصاءات المستمدة من رسالة معينة على سائر الرسائل التي يولدها المصدر نفسه .

تبرهن الاستنتاجات المتعلقة بنظرية الاتصالات من أجل المصادر المستقرة الافتراضية . يشكل كل الكتاب مصدرا مستقرا تقريبا للنصوص لا يفترق المصدر المستقر الافتراضي عن المصدر المستقر الفعلي الا قليلا ، لذا نستطيع تطبيق رياضيات الاول على الثاني والحصول على نتائج مفيدة . الا اننا يجب ان ناخذ ما يلزم من الحذر عند تطبيق احكام نظرية الاتصالات الرياضية المصاغة لمصادر افتراضية ، على المشاكل الفعلية للاتصالات .





الفصل الرابع

الترميز ونظام العد الثنائي

يمكن أن يكون المصدر المعلوماتي نصاً مكتوباً ، انساناً يتكلم ، أصوات جوقة موسيقية ، صوراً ، أفلاماً سينمائية ، أو مشاهد يمكن تسديد الكاميرا التلفزيونية ناحيتها . رأينا ، انه وفق نظرية المعلومات ، تعتبر هذه المصادر مالكة لخصائص المصادر المستقرة التي تولد الأحرف ، الأعداد ، أو الاشارات الكهربائية . ان الهدف الرئيسي لنظرية المعلومات هو دراسة كيفية ترميز سلاسل الأحرف والاشارات هذه بأكبر فعالية ممكنة وبوسائل كهربائية عموماً ، وذلك لإعدادها للإرسال .

لقد سمع الجميع عن الرموز وترميز الرسائل ، أو ما يسمى بالشيفرة . وتزخر المكتبات بقصص الأبطال الخياليين الذين يستخدمون الرسائل المرمزة السرية لتنفيذ أعمالهم الخارقة .

استخدمت الكتابة السرية بمعناها التاريخي الرموز لإخفاء مضامين الرسائل الهامة عن كل الذين لم تكن تلك الرسائل تقصدهم . ويمكن تنفيذ ذلك بتبديل كلمات الرسائل بكلمات أخرى مقابلة وفق قاموس ترميز معين . وفي طريقة أخرى للترميز هي طريقة التشفير يستعاض عن الأحرف والأعداد بأحرف أخرى وفق اتفاق بين الأطراف المعنية .

ترد فكرة الترميز ، أي فكرة تمثيل شيء بآخر ، في مجالات أخرى أيضاً . يعتقد علماء الوراثة أن الخطة الشاملة لعمل الجسم الانساني

مكتوبة في الموروثات المدفونة في الخلية التناسلية ويؤكدون ان النص الوراثي يتكون من ترتيب خطي لأربع وحدات داخل حمض الـ DNA المكون للموروثات . ينتج هذا النص بدوره نصاً مكافئاً في حمض الـ RNA ، حيث يتم بواسطة هذا الأخير تصنيع البروتينات من عشرين نوع من الحموض الأمينية . وقد جرت دراسات معمقة لفهم الطريقة التي يعاد وفقها ترميز رسالة الـ RNA الوراثية ذات الأربع مقاطع بحيث تتحول الى رسالة البروتين ذات العشرين مقطع .

توصل علماء الوراثة الى هذه الاعتبارات بسبب وجود نظرية المعلومات . ادت دراسة انتقال المعلومات لفهم جديد وعام لمسائل الترميز ، وهو فهم على جانب كبير من الأهمية سواء في مجال ترميز الرسائل ، او مجال ترميز المعلومات الوراثية .

استعرضنا في الفصل الثاني كيفية ترميز نص لغوي وفق طريقة مورس باستخدام نبضات كهربائية طويلة وقصيرة تفصل بينها فواصل طويلة وقصيرة . كان ذلك مثال بسيط للترميز . ترى نظرية المعلومات في الأمواج الكهرطيسية التي ترتحل من دار الاذاعة وحتى الراديو في كل منزل أسلوباً في ترميز الموسيقى وسواها مما نسمعه لدى ادارتنا مفتاح جهاز الراديو . وكذلك شأن التيارات الكهربائية في اسلاك الهاتف فهي ترميز للخطاب المتبادل واخيراً فأمواج الانضغاط والتخلخل في الهواء الناقلة للصوت ما هي إلا ترميز لحركات الحبال الصوتية التي تصدر الأصوات .

حددت الطبيعة ترميز حركات الحبال الصوتية على شكل اصوات التخاطب الا انه يمكن لمهندس الاتصالات اختيار طريقة الترميز التي سيمثل بواسطتها أصوات التخاطب بتيارات كهربائية ، تماماً كما يختار نظام النقاط والخطوط والفواصل لتمثيل الاحرف الابجدية في الارسال البرقي . ويسعى هذا المهندس لتحقيق افضل ترميز ممكن ، وللوصول الى هذه الغاية لا بد من وجود معيار يفصل المهندس بواسطته بين الترميز

الفعال والترميز السيء كما وان هذا المهندس يجب أن يمتلك النظرة الثاقبة لإنجاز الترميز المنشود . سبق أن تعلمنا بعض هذه الأمور في الفصل الثاني .

ادت دراسة هذه المشكلة بالذات ، وهي دراسة قد تبدو بحد ذاتها محدودة ، الى تطوير افكار هامة عبر نظرية المعلومات ، تتجسد اكثر ما يمكن في مجال الترميز سواء في اصدار الرسائل السرية او كشف الشيفرة الوراثية . تضمنت هذه الأفكار معياراً للكم المعلوماتي هو الانتروبي وواحدة لقياس المعلومات هي البيت Bit . .

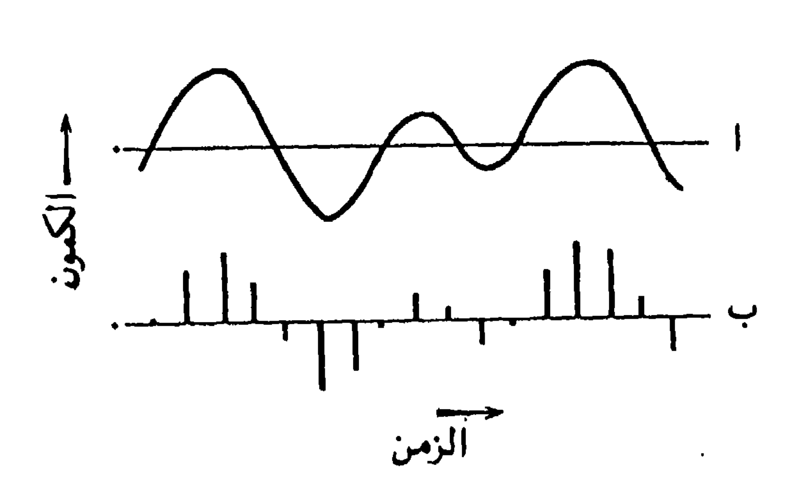
اميل الى الاعتقاد في هذه المرحلة أن القارىء قد أصبح في وضع المطالبة الملحة . لمعرفة معنى (الكم المعلوماتي) كما يقاس بالبيت ، واذا كان هذا هو حاله فعلا ، فارجو أن يحمله حماسه عبر كميات من المعلومات الوسيطة تتناول ترميز الرسائل .

لعله امر بديهي أن أحداً ما لن يستطيع فهم وتقييم حل مسألة معينة الا اذا كان لديه فكرة عن المسألة بحد ذاتها . لن يستطيع أي منا شرح الموسيقى لشخص لم يسمع في حياته اي عمل موسيقي . اشعر بشكل مماثل أنه كي نستطيع تقييم الحاجة لقياس الكم المعلوماتي وفهم معناه لا بد لنا من التناول التفصيلي لكيفية ترميز الرسائل بغية بثها برقياً .

نلجأ الى الأمثلة البسيطة بغية فهم مشكلة الترميز . ونهدف في النهاية بالطبع الى تعلم ما له فائدة واسعة ، وعند ذلك نتوقع بعض الصعوبات .

تتكون بعض الرسائل الهامة من سلاسل من الاحرف المنفصلة كالاحرف الابجدية المتتالية او الأعداد المتتابعة في خرج الكومبيوتر . لقد بينا فيما سبق أن أنواعاً أخرى من الرسائل تختلف بشكل جذري .

ان الأصوات والموسيقى هي تغيرات ضغط الهواء عند اذن السامع . نمثل هذا الضغط وبدرجة كافية من الدقة لدى استعمالنا الهاتف بتغيرات كمون اشارة كهربائية مرتحلة عبر الأسلاك أو بكمية اخرى مناسبة . يمثل الشكل ٤ ـ ١ تغير مثل هذه الاشارة مع الزمن حيث نفرض أن الاشارة هي عبارة عن كمون كهربائي متغير مع الوقت ، كما يوضح الخط المتموج .



الشكل ٤ ـ ١

تصبح نظرية المعلومات محدودة الاهمية اذا لم تكن قابلة التطبيق على الرسائل والاشارات المستمرة ، كقابليتها للتطبيق على الرسائل المنعزلة ، كالنصوص اللغوية .

تستحضر نظرية المعلومات لدى تناولها الاشارات المستمرة نظرية رياضية هي نظرية العينات ، وسنقوم باستخدامها دون برهانها . تنص هذه النظرية على انه يمكننا تمثيل الاشارة المستمرة بشكل كامل وكذلك اعادة انشائها بكل تفاصيلها اذا توفر لدينا عينات أو قياسات لسعتها

منجزة عند لحظات زمنية تفصل بينها فترات متساوية . يجب أن تكون هذه الفترة مساوية او اقل من نصف دور أعلى تواتر متواجد في الاشارة. واذا عدنا الى الشكل ٤ ــ ١ الممثل لاشارة متغيرة مع الزمن فإن العينات المطلوبة في حالة هذه الإشارة يمكن تمثيلها بخطوط شاقولية كما هو موضح في القسم الاسفل من نفس الشكل .

يجب أن نلاحظ ان قدرة هذه العينات على تمثيل الاشارة بشكل كامل تتوقف على توفر عدد كبير منها بدرجة كافية . نحتاج في حالة تواترات الصوت المحصورة بين ٠ و ٤٠٠٠ هـ ف ث الى ٨٠٠٠ عينة في كل ثانية ، أما في الاشارة التلفزيونية التي يتراوح تواترها بين ٠ الى ٤ ملايين هـ ف ث فنحتاج الى ٨ ملايين عينة في كل ثانية . وبصورة عامة اذا كان عرض مجال تواتر الاشارة هو س هـ ف ث ، فنحتاج على الاقل لـ ٢ س عينة في كل ثانية لتوصيف هذه الاشارة بشكل كامل .

وهكذا تمكننا نظرية العينات من تمثيل اشارة مستمرة بسلسلة من العينات مختلفة السمات . تختلف هذه السلسلة ، على كل حال ، عن سلسلة الأحرف او الأرقام ، فهناك عدد من الأرقام (٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩) والأحرف (الاحرف الأبجدية) بينما يمكن للعينة ان تتضمن عدداً لا نهاية له من السمات المختلفة . ان كل سمة في عينة يمكنها أن تقع في اي نقطة من مجال مستمر من القيم ، بينما لا ينتقى الرقم او الحرف الا من مجموعة محددة من العناصر المنعزلة .

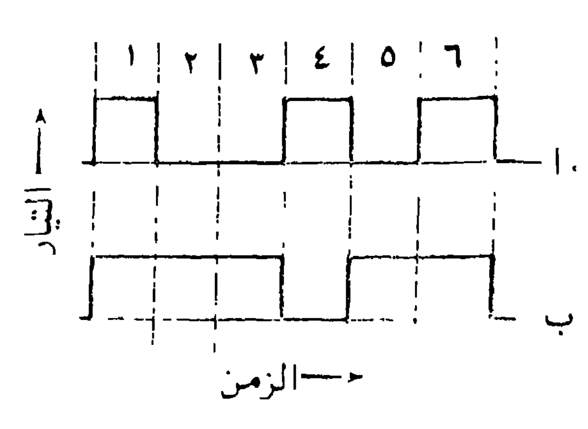
اذا اعتبرنا الطريقة التي تتعامل بها نظرية المعلومات مع العينات ذات المجال المستمر من السمات لراينا هذه الطريقة تشكل بحثاً بحد ذاته ستعود اليه فيما بعد . سنقتصر هنا على ملاحظة مفادها انه ليس من الضروري أن توصف الاشارة او تستعاد بشكل كامل ، ففي الأجهزة

الفيزيائية الواقعية لا يمكن استرجاع الاشارة بصيغتها الأصلية . وتكتفي في ارسال الأصوات مثلا بتمثيل سعة العينة بدقة ١٪ . وهكذا يمكننا ، اذا رغبنا ، قصر انفسنا على الأعداد بين ٠ الى ٩٩ في مجال توصيف سعات عينات الأصوات المتتالية وتمثيل سعة عينة محددة بأحد الأعداد المئة المذكورة حيث ستكون بذلك قريبة من السعة الحقيقية بدرجة كافية . نستطيع بواسطة عملية تجزئة الاشارة الى عينات الحصول على تمثيل شبيه بحالة الاشارات المنعزلة الممثلة لنص لغوي .

استطعنا باستخدام العينات المحددة القيم تحويل مسالة ترميز اشارة مستمرة كالصوت مثلا الى مسالة ابسط هي ترميز اشارات منعزلة كأحرف النصوص اللغوية .

رأينا في الفصل الثاني أن النصوص اللغوية يمكن بثها حرفا بحرف باستخدام طريقة مورس في الترميز ، وبطريقة مماثلة يمكن بث هذه الرسائل عبر لوحة المبرقة . ان ضغط أحد أزرار هذه اللوحة يؤدي الى امرار سلسلة من النبضات الكهربائية والفواصل عبر الدارة . عندما تصل هذه النبضات والفواصل جهاز الاستقبال تحرض الزر المقابل فتطبع اذ ذاك الآلة الحرف المرسل .

تشكل قطارات النبضات والفواصل طريقة عامة ومفيدة لتوصيف او ترميز الرسائل . وعلى الرغم من أن شيفرة مورس ورموز المبرقة تستخدم نبضات وفواصل من أطوال مختلفة فانه بالمقابل يمكن بث الرسائل باستخدام النبضات والفواصل المتساوية الطول المرسلة عبر فترات زمنية متساوية . يوضح الشكل ٤ ـ ٢ كيف يمكننا أن نستخدم النبضات والفواصل المتساوية في تشكيل اشارتين مختلفتين ، تتكون كل منهما من ستة فترات ، فأما الاشارة أ فتتكون من : نبضة ـ فاصل ـ فاصل ـ نبضة ـ فاصل ـ نبضة ، في حين تتكون الاشارة ب من : نبضة ـ نبضة ـ نبضة ـ فاصل ـ نبضة ـ نبضة .



الشكل ٤ ـ ٢

يحدد وجود نبضة أو فاصل في فترة معينة احدى إمكانيتين ، فيمكننا بذلك من الاستخدام اي زوج من الرموز لتمثيل النبضة والفاصل ، ونجد من بين ازواج هذه الرموز : نعم ـ لا ، + ـ ـ ، ١ ـ ٠ .

وبذلك نمثل الإشارة آ على النحو :

نبضة	فاصل	نبضة	فاصل	فاصل	نبضة
نعم	لا	نعم	لا	لا	نعم
+	−	+	−	−	+
١	٠	١	٠	٠	١

يتسم التمثيل باستخدام الرمزين ٠ ، ١ بكونه هام وملائم بشكل خاص ، اذ يمكن استخدامه لربط قطارات الامواج بنظام العد المثنى .

عندما نكتب العدد ٣١٥ نعني :

$$3 \times 10^{2} + 1 \times 10^{1} + 5 \times 10^{0}$$
$$= 3 \times 100 + 1 \times 10 + 5 \times 1$$
$$= 315$$

نستخدم في النظام العشري المعتاد هذا الارقام العشرة : ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ . اما في النظام المثنى فنستخدم الرقمين ٠ ، ١ . وهكذا عندما نكتب في هذا النظام ١٠٠١٠١ فإنما نعني :

٠ ١ ٢ ٣ ٤ ٥

٢ × ١ + ٢ × ٠ + ٢ × ١ + ٢ × ٠ + ٢ × ٠ + ٢ × ١

= ١ × ١ + ٤ × ١ + ٣٢ × ١ = ٣٧ في النظام العشري

قد يكون من المناسب احيانا كتابة الاعداد وإضافة اصفار الى يسارها ، ان هذا لا يغير من قيمة العدد . وهكذا ففي النظام العشري :

١٦ = ٠٠١٦

أما المساواة المقابلة في النظام المثنى فهي :

١٠٠٠٠ = ٠٠١٠٠٠٠

يدعي كل من الرقمين ٠ او ١ في النظام المثنى برقم مثنى . اذا اردنا توصيف النبضات او الفواصل الواردة في ستة فترات متتالية نستخدم ستة ارقام ثنائية مناسبة . ولما كانت النبضة او الفاصل في فترة واحدة تكافىء رقم مثنى ، نستطيع ان نتحدث في هذه الحالة عن زمرة نبضية من ستة ارقام ثنائية ، كذلك يمكننا ان نشير الى نبضة او فاصل في فترة معينة على انه رقم مثنى .

دعونا نبحث عن عدد الإشارات الممكنة والمختلفة باستخدام ثلاثة ثلاثة فترات متتالية نملىء كل منها بنبضة او فاصل ، بكلمة اوضح ما هو عدد الأعداد في النظام المثنى التي يتكون كل منها من ثلاثة ارقام ثنائية .

ان هذه الأعداد هي ببساطة :

العدد بالنظام المثنى	القابـل العشـري
٠٠٠	٠
٠٠١	١
٠١٠	٢
٠١١	٣
١٠٠	٤
١٠١	٥
١١٠	٦
١١١	٧

إذن فعدد الأعـداد المطلوبة هو ثمانية ونلاحظ أن ٨ = $٢^{٣}$ ، وبصورة اعم فعدد الأعداد الثنائية المكون كل منها من ن رقم مثنى هو : $٢^{ن}$

نوضح في الجدول التالي عدد الأعداد الثنائية المكون كل منها من ن رقم مثنى وذلك من أجل بعض قيم ن :

ن (عدد الأرقام الثنائية المستخدمة)	عدد الأعداد الناتجة (نماذج من ن رقم مثنى)
١	٢
٢	٤
٣	٨
٤	١٦
٥	٣٢
١٠	١٠٢٤
٢٠	١٠٤٨٥٧٦

نلاحظ ان عدد الأعداد الناتجة أو عدد النماذج المكونة من ن رقم مثنى يزداد بسرعة كبيرة جدا وسبب ذلك اننا نضاعف العدد المطلوب في كل مرة نضيف مكان جديد في العدد المكون ، فعندما نضيف رقم نحصل على كل الأعداد السابقة مسبوقة بـ ٠ وكذلك كل الأعداد السابقة مسبوقة بـ ١ .

يشكل النظام المثنى البديل الوحيد للنظام العشري ، اذ أن للنظام الثماني اهمية خاصة لدى بناة اجهزة الكومبيوتر . يستخدم النظـام الثماني الأرقام الثمانية : . ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ .
عندماتكتب ٣٥٦ في النظام الثماني نعني :

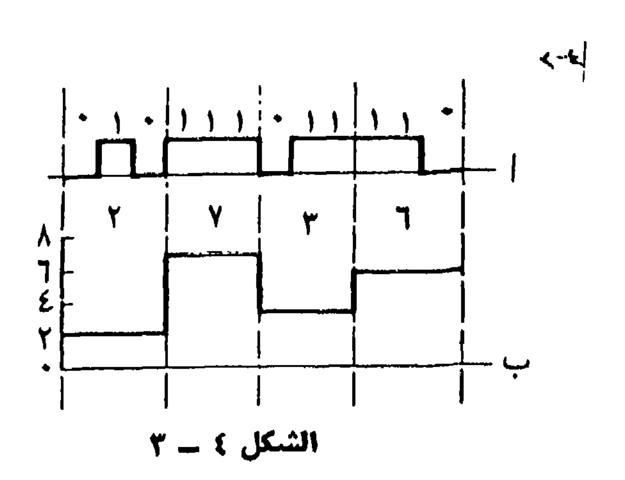
$$٣٥٦ = ٣ \times ٨^{٢} + ٥ \times ٨^{١} + ٦ \times ١$$
$$= ٣ \times ٦٤ + ٥ \times ٨ + ٦ \times ١$$
$$= ١٩٢ + ٤٠ + ٦ = ٢٣٨$$ في النظام العشري

نستطيع التحويل بين النظامين المثنى والثماني بسهولة فائقة ، اذ ما علينا إلاّ استبدال كل تركيب من ثلاثة أرقام ثنائية بمقابلها الثماني كما في المثال التالي :

مثنى	١١٠	٠١١	١١١	٠١٠
ثماني	٦	٣	٧	٢

يفضل من يستخدمون الكومبيوتر استظهار ومن ثم استذكار الأرقام من النظام الثماني على التعامل مع السلاسل الطويلة من الأرقام الثنائية . انهم يتعلمون تمييز زمر ثلاثية من الأرقام الثنائية والتعامل مع كل زمرة كوحدة ، وهكذا ينظرون الى تسع ارقام ثنائية على انها ثلاثة زمر وبشكل أوضح سلسلة من ثلاثة أرقام ثمانية .

انه أمر ممتع حقاً أن نتناول سلاسل النبضات والفواصل وفـق نفس المنظور اي انها تمثل سلاسل من الارقام الثنائية ، وبالتالي فسلسلة من نبضات ذات سعات مختلفة تقابل سلسلة من الارقام الثمانية (٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧) يوضح ذلك الشكل ٤ ــ ٣ . حيث نرى في القسم آ منه سلسلة من الارســال ــ التوقف ، أو الوصل ــ فصل ، أو ١ ــ ٠ مقابلة للعدد المثنى : ٠١٠١١١٠١١١١١٠ ، أما العدد الثماني المقابل فهو : ٢٧٣٦ ، بينما في القسم ب تمثيل آخر للعدد كاربع نبضات لها السعات التالية : ٦ ٣ ٧ ٢ .



الشكل ٤ ــ ٣

ان التحويل من النظام المثنى الى النظام العشري ليس امراً سهلاً . ويحتاج تمثيل كل رقم عشري حوالي ٣٫٣٢ رقم ثنائي . يمكننا بالطبع تخصيص اربع ارقام ثنائية لكل رقم عشري ، كما هو مبين في الجدول التالي الا ان ذلك يعني ضياع بعض التشكيلات دون استخدام ، فهناك من تلك التشكيلات اكثر مما يلزمنا :

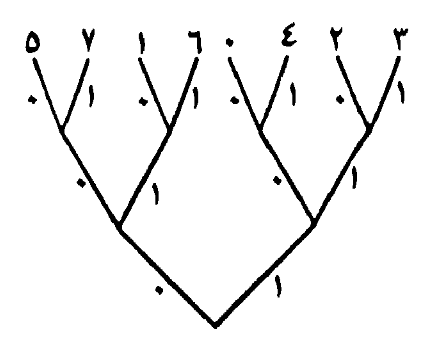
العدد المثنى	الرقم العشري
٠٠٠٠	٠
٠٠٠١	١
٠٠١٠	٢
٠٠١١	٣
٠١٠٠	٤
٠١٠١	٥
٠١١٠	٦
٠١١١	٧
١٠٠٠	٨
١٠٠١	٩
١٠١٠	غير مستعمل

١٠١١	غير مستعمل
١١٠٠	غير مستعمل
١١٠١	غير مستعمل
١١١٠	غير مستعمل
١١١١	غير مستعمل

ان اعتبار سلاسل النبضات والفواصل أو سلاسل الـ ٠ و الـ ١ على انها أرقام ثنائية هو اعتبار ملائم حقاً . يتيح لنا ذلك معرفة عدد السلاسل المختلفة وكذلك أسس التقابل بين انظمة العد الثلاثة : المثنى والثماني والعشري . الا يهمنا عند ارسال المعلومات العدد المقابل لسلسلة أرقام ثنائية ، اذ يكفي فقط ان نرسل الارقام الثنائية الممثلة لعدد ثماني بصرف النظر عن هذا العدد ، فمثلاً نرسل : ٠٠٠ ٠٠١ ٠١٠ ٠١١ ١٠٠ ١٠١ ١١٠ ١١١ ولا يهمنا النظائر الثمانية ٠ ١ ٢ ٣ ٤ ٥ ٦ ٧ .

يمكننا اعتبار التقابل بين النظام المثنى وسواه بطريقة اخرى ، وتنطوي هذه الطريقة على تجاهل كون هذه الارقام ممثلة لاعداد ثنائية واستخدامها بدلاً من ذلك لاختيار أو تحديد رمز معين .

يمثل كل ورود للصفر أو الواحد امكانية الخيار بين احتمالين . نعتبر مثلاً شجرة الاختيار الموضحة في الشكل ٤ ــ ٤ .



الشكل ٤ ــ ٤

عندما نتحرك الى الاعلى بدءاً من الجذر الى الفروع فان ورود الصفر يعني اختيار الفرع الايسر بينما نختار الفرع الايمن اذا صادفنا الواحد. وهكذا تعني السلسلة ١١٠ التحرك وفق الاتجاهات التالية : يسار ، يمين ، يمين وهذا يحملنا الى الرقم الثماني ٦ .

تعطينا ثلاثة أرقام ثنائية المعلومات الكافية لاجراء اختيار معين من بين ثمانية امكانات مختلفة ، وبالمثل تعطينا اربعة ارقام ثنائية المعلومات الكافية لاجراء اختيار معين من بين ١٦ امكانية مختلفة ، ويرتفع هذا الرقم الى ١٠٤٨٥٧٦ امكانية مختلفة في حالة توفر ٢٠ رقم مثنى . ونحصل على الامكانات المختلفة في كل حالة بتوزيع الارقام الثنائية وبكل الاشكال الممكنة في الخانات المعتبرة للعدد المثنى (٣ — ٤ — ... — ٢٠ — الخ) .

ليس ضرورياً ان تكون تلك الخانات أعداداً ثنائية . فقد بدانا دراستنا ببحث كيفية ترميز النصوص اللغوية بهدف ارسالها برقياً بواسطة سلاسل من النبضات الكهربائية والفواصل والتي يمكن بدورها ان تمثل بارقام ثنائية .

يحتاج ارسال النصوص الانكليزية حرفاً بحرف الى ٢٦ حرف وفراغ اي ٢٧ رمز ، هذا اذا لم ناخذ بعين الاعتبار الرموز الخاصة كالفواصل وغيرها .

يمكننا ان نكتب الاعداد بكلمات وان نهمل رموزها (مثلاً نكتب ثلاثة عوضاً عن ٣) ، ونستخدم كلمات للتعبير عن الرموز الخاصة (مثلاً نكتب فاصلة عوضاً عن ، ٢ نقطتين عوضاً عن : وهكذا) .

تقول الرياضيات ان الاختيار من بين ٢٧ رمز يحتاج من الارقام الثنائية ما يساوي عدده ٤٫٧٥ رقم مثنى . اذا لم نكن معنيين كثيراً بالكفاءة العالية فنستطيع تخصيص عدد مثنى مكون ٥ ارقام ثنائية لكل حرف وهذا يشكل فائضاً من الاعداد الغير مستخدمة يساوي ٥ اعداد ثنائية مكون كل منها من ٥ ارقام ثنائية .

تمتلك بعض الالات الكاتبة ٤٨ زر مختلف بما في ذلك الرفـع وزر الاغلاق ، ويمكن ان نضيف اليها آليتي التقدم بسطر واحد والعودة الى اول السطر . يمكن ان ارمز نشاطاتي باستخدام كل امكانات الآلة الكاتبة (باستثناء وضع الورق اللازم في الآلة) وذلك باجراء خيارات متتالية من اصل الـ ٥٠ خيار المتوفر ، حيث يقابل كل خيار ٥ر٦٢ رقم مثنى . وكالعادة يمكن أن نستخدم ٦ ارقام ثنائية لكل زر من ازرار الآلة ونهدر بنتيجة ذلك بعض سلاسل الارقام الثنائية .

يتكون هذا الفائض بسبب وجود ٣٢ عدد مثنى من الاعداد المؤلفـة من ٥ ارقام ثنائية وهو عدد قليل ، بينما يوجد ٦٤ عدد مثنى من الاعداد المؤلفة من ٦ ارقام ثنائية وهذا كثير الى حد ما . كيف يمكن أن نتحاشى مثل هذا الهدر ؟ اذا اعتبرنا ٥٠ رمز مختلف فانه يمكننا تكوين ١٢٥٠٠٠ زمرة متباينة تتكون كل زمرة منها من ثلاثة من هذه الرموز . واذا عدنا الى الارقام الثنائية فنستطيع أن نكون ١٣١٠٧٢ تركيب مختلف بحيث يحتوي كل تركيب على ١٧ رقم مثنى . وهكذا اذا جزئنا النص الـى زمر من ٣ احرف متتالية واذا ربطنا كل زمـرة منها بعدد مثنى مكون من ١٧ رقم مثنى فنحصل على ترميز جيد ويفيض لدينا القليل . أما اذا مثلنا كل حرف بـ ٦ ارقام ثنائية لاحتجنا ١٨ رقم مثنى في تمثيل ٣ احرف متتالية ، وهكذا فان طريقـة الترميز الاولى خفضت مـن استخدامنا للارقام الثنائية بنسبة $\frac{١٧}{١٨}$.

يمكننا بالطبـع ترميز النصوص الانكليزية بشـكل مغاير تماماً . ونستطيع استخدام اللغة الانكليزية بشكل فعال اذا احطنا بمعاني حوالي ١٦٣٨٤ كلمة وهو قاموس جيد من الكلمات . يعود اصل هذا الرقـم الى اننا نعلم أن هناك ١٦٣٨٤ عدد مثنى يتكون كل منها من ١٤ رقـم ثنائي . وهكذا بتخصيص ١٦٣٥٧ من هذه الاعداد لتمثيل الكلمـات المستخدمة الضرورية وباقي الـ ٢٧ لتمثيل الاحرف والفراغ ، لحصلنا على ترميز جيد سيما وأن وجود الاحرف سيفسح المجال لاستخدام

كلمات اضافية لم نلحظها في القاموس المكون من ١٦٣٥٧ كلمة . ليس من الضروري أن نضع فراغاً بين الكلمات التي تقابلها رموز عددية اذ يمكن أن نفترض أن الفراغ هو جزء من كل كلمة .

اذا برزت الحاجة لاستخدام بعض الكلمات بشكل غير متواتر ، فيتوجب علينا اذ ذاك استخدام ١٤ رقم مثنى لكل كلمة في هذا النوع من الترميز . تشير المعدلات الاحصائية الى أن وسطي عدد الاحرف في كل كلمة من كلمات اللغة الانكليزية هو ٤,٥ حرف . ولما كان من المفروض أن نفصل الكلمات بفراغات عندما نبث الرسالة حرفاً بحرف يرتفع هذا العدد الى ٥,٥ حتى في حالة اهمالنا بعض الاستخدامات الخاصة في النص كايراد الاحرف الكبيرة وتوضيع الفواصل . اذا خصصنا ٥ أرقام ثنائية لكل حرف فسيلزمنا ٢٧,٥ رقم مثنى لكل كلمة ، بينما نحتاج فقط لـ ١٤ رقم مثنى لكل كلمة اذا لجأنا لترميز الكلمات بدلاً من الاحرف وقمنا ببثها كلمة بكلمة .

كيف يمكن أن يحدث ذلك ؟ اذا عمدنا لبث الرسالة حرفاً بحرف فسنستخدم امكانات متكافئة لارسال كل سلاسل الاحرف الانكليزية ، اما الارسال كلمة بكلمة فسيقصر الامر على الكلمات الانكليزية وحسب .

ان عدد الارقام الثنائية الضرورية لترميز كل كلمة من النصوص الانكليزية يتوقف الى حد بعيد على طريقة الترميز المعتمدة .

ان النصوص اللغوية هي نوع من جملة أنواع أخرى من الرسائل قد نرغب ببثها . تشتمل الانواع الاخرى على سلاسل الارقام ، الصوت البشري ، الصور المتحركة أو الصور الثابتة . وهكذا فاذا كانت هناك طرق فعالة واخرى غير فعالة لترميز النصوص اللغوية ، فنتوقع بالمقابل أن يكون هناك طرق فعالة وأخرى غير فعالة في ترميز الرسائل الأخرى .

يغمرنا اعتقاد كبير بانه يوجد من حيث المبدأ طريقة مثلى لترميز الاشارات الصادرة عن منبع للرسائل ، مثل هذه الطريقة ستحتاج عدداً أصغرياً من الارقام الثنائية لكل حرف ولكل واحدة من زمن الارسال .

اذا توفرت مثل هذه الطريقة المثلى لترميز الاشارة ، فنصطلح على استخدام العدد الوسطي للارقام الثنائية اللازمة لترميز الاشارة كمعيار للمحتوى المعلوماتي أو الكم المعلوماتي في كل حرف او كمعيار للكم المعلوماتي الذي يولده في كل ثانية مصدر الرسائل الذي اعطى الاشارة المعتبرة .

هذا ما نفعله بالضبط في نظرية المعلومات ، اما كيفية تحقيق الفعل واسبابه فسنتركها للفصل القادم .

اما الآن ، فسنراجع وبسرعة ما قدمناه في هذا الفصل . نعتبر الترميز في نظرية المعلومات كقضية اساسية ، والترميز ببساطة هو تمثيل اشارة بغيرها . وهكذا تمثل امواج الراديو اصوات التخاطب وبذا فهي ترميز لتلك الاصوات . يمكننا بحث الترميز ببساطة وعمق في حالة مصادر الرسائل المتقطعة والتي تولد رسائل مؤلفة من سلاسل من الاحرف أو الارقام . اما عن الاشارات المستمرة ، فالامر اعقد الا انه لحسن الحظ نستطيع تمثيل الاشارة المستمرة بعينات من سعاتها وذلك باستخدام عدد من العينات في كل ثانية يساوي ضعف اعلى تواتر للاشارة، وخير مثال على الاشارات المستمرة التيارات الكهربائية في خطوط الهاتف. بل ونستطيع اكثر من ذلك ، فبامكاننا تمثيل سعات هذه العينات باعداد صحيحة .

ان اهم طرق ترميز الاحرف أو الاعداد في نظرية الاتصالات هي تلك التي تعتمد سلاسل من القطع والوصل والتي بدورها يمكن ان تمثل بالارقام الثنائية . ١،٠ . وكمثال على ذلك : اذا استخدمنا سلاسل من زمر بحيث تتكون كل زمرة من ٤ أرقام ثنائية نستطيع تكوين ١٦ عدد ثنائي نخصص منها ١٠ لتمثيل الارقام العشرية ، واذا رفعنا محتوى كل زمرة الى ٥ أرقام ثنائية ارتفع عدد الاعداد الثنائية المكونة الى ٣٢ ، نجتزىء منها ٢٧ لتمثيل الابجدية في اللغة الانكليزية مع فراغ مضاف . باختصار نستطيع ارسال الاعداد العشرية والنصوص اللغوية ببث سلاسل كهربائية تتضمن القطع والوصل .

يجدر بنا ان نقف عند فكرة هامة ، فعلى الرغم من انه يبدو مريحاً ان نعتبر الارقام الثنائية المستخدمة بهذا الشكل اعداداً ثنائية بالمعنى الرياضي ، فان هذا المعنى ليس له اي اهميـة البتة في عملنا ، اذ أن بمقدورنا اختيار أي عدد ثنائي لتمثيل عدد عشري معلوم .

ان استخدامنا لعشرة من الاعداد الثنائية المكون كل منها من أربعة ارقام ثنائية يعني هدرنا للاعداد الستة الاخرى . نستطيع ان نرسل هذه الاعداد وفق نفس تكنيك القطع والوصل ، الا انا لا نفعل ذلـك ابداً . يمكننا تحاشي مثل هذا الهدر بترميز سلاسل مؤلفة من ٢ ، ٣ ، او أكثر من الارقام العشرية او الاحرف الاخرى بواسطة الارقام الثنائية. فمثلاً يمكننا تمثيل كل السلاسل المكونة من ثلاثة ارقام عشرية باستخدام عشرة ارقام ثنائية ، بينما يقتضي الامر ١٢ رقم ثنائي للتمثيل المنفصل لكل من الأرقام العشرية الثلاثة .

ان ورود اي سلسلة من الارقام العشرية هو أمر ممكن ، الا أن سلاسل الاحرف لا ترد جميعها ، اذ لا يرد من سلاسل الاحرف الا الكلمات المستخدمة في اللغة المعتبرة . ويبدو استناداً لهذه الحقيقـة ان ترميز الكلمات باستخدام الارقام الثنائية سيكون اكثر كفاءة مـن ترميز الاحرف الابجدية تعزز هذه النتيجة صحة الفكرة القائلة ان ترميز السلاسل اكثر اقتصادية من ترميز عناصرها بشكل منفصل .

يقودنا كل ذلك الى الحدس بأن هناك طريقة مثلى لترميز الرسائل التي يولدها مصدر رسائل ، وتعرف هذه الطريقـة بكونها تحتاج الى اصغر كمية ممكنة من الارقام الثنائية .





الفصل الخامس

الانتروبي

استعرضنا في الفصل السابق طرقاً مختلفة لترميز الرسائل ،وتتضمن كل انواع الاتصالات ، في الواقع ، ضرباً من الترميز . ففي الحالة الكهربائية ، يمكن ترميز الاحرف باستخدام نقاط وخطوط التيار الكهربائي او شدات مختلفة للتيار واتجاهات عديدة لتدفقه كما في مبرقة اديسون الرباعية . كذلك يمكننا ترميز الرسالة باستخدام الارقام الثنائية : ٠ ، ١ وبثها كهربائياً كسلسلة من النبضات والفواصل .

لقد بينا بالفعل أن اخذ العينات بشكل دوري من اشارة مستمرة كموجة التخاطب مثلاً ؛ وان تمثيل شدات العينات بشكل تقريبي عن طريق انتقاء اقرب قيمة من مجموعة من الاعداد المنفصلة ، كل ذلك سيمكننا من تمثيل او ترميز حتى الاشارات المستمرة باستخدام الارقام الثنائية .

اوضحنا ان عدد الارقام التي يحتاجها الترميز يتوقف على طريقة الترميز . وهكذا يلزمنا عدد اقل من الارقام الثنائية اذا رمزنا زمر من الاحرف عوضاً عن ترميز كل حرف على حدة . ونظراً لان عدد تراكيب الاحرف المعتمدة في اللغة قليل جداً بالمقارنة مع كل تراكيب الاحرف ، فان الامر المهم هنا هو ان ترميز الكلمات في نص معين سيستهلك عدداً من الارقام الثنائية اقل بكثير مما لو رمزنا احرف النص كلٍ على حدة .

نؤكد ان هناك طرقاً عديدة لترميز الرسائل المتولدة عن مصدر مستقر ، كمصدر للنصوص اللغوية مثلاً . ماذا ستكون الحاجة الفعلية من الارقام الثنائية لكل حرف أو كلمة ؟ هل سيتحتم علينا تجريب كل اشكال الترميز الممكنة لنقرر أيها الامثل . ولكن اذا جربنا كل الاشكال الممكنة وانتقينا الامثل ، فسنبقى في شك من امرنا ، اذ قد يكون شكل الترميز الامثل ذاك الذي لم يخطر على بالنا وبالتالي لم نجربه .

الا توجد طريقة احصائية ، على الأقل من حيث المبدأ ، تمكننا من اجراء معايرات احصائية على الرسائل المتولدة عن مصدر معين ، مثل تلك المعايرات ستلفت نظرنا الى قيمة صغرى وسطية لعدد الأرقام الثنائية المقابلة لكل إشارة ، ويمكن استخدام هذه القيمة في ترميز الرسائل .

نعود الى نموذج المصدر المرسل الذي عرضناه في الفصل الثالث واعتبرنا انه مصدر مستقر للرموز كالأحرف او الكلمات . يتسم المصدر بخصائص إحصائية ثابتة مثل : التواتر النسبي للرموز ، احتمال أن يلي رمز معين رمزاً آخر معلوم او زوجاً من رمزين محددين ، أو تركيباً من ثلاثة رموز وغير ذلك .

نتحدث في حالة النصوص اللغوية عن التواترات النسبية للكلمات وعن احتمال أن تلي كلمة معينة كلمة اخرى معلومة ، أو زوجاً من الكلمات ، أو تركيباً ثلاثياً منها ، وكذلك تراكيب أعلى .

لقد عمدنا بهدف توضيح الخصائص الاحصائية لسلاسل الأحرف أو الكلمات لشرح كيفية انشاء تراكيب تشبه النصوص اللغوية الطبيعية وذلك باجراء سلسلة من الخيارات العشوائية بين الأحرف والكلمات ، بشرط أن يؤخذ بعين الاعتبار الاحتمالات الخاصة بتلك الأحرف والكلمات ، أو احتمالات سبقها لسلاسل أخرى من الأحرف والكلمات . لقد انجزنا الخيارات العشوائية في هذه الأمثلة برمي حجر النرد أو السحب العشوائي لبطاقة من جعبة او غير ذلك من العمليات الاحتمالية .

نمارس خياراً مشابهاً أثناء الكتابة او القراءة : ماذا سنقول بعد او ماذا ستكون جملتنا التالية . لا نجد في بعض الأحيان اي خيار ففي اللغة الانكليزية مثلاً إذا كتبنا الحرف Q فعلينا بشكل ملزم ان نكتب بعده الحرف U . وبصورة عامة يكون لدينا خيار اكبر لدى محاولتنا كتابة الحرف الثاني من كلمة بالمقارنة مع الخيار المتبقي لدى بلوغنا منتصف الكلمة . يبرز الخيار ، على الرغم من ذلك ، ويمارس بشكل مستمر في كل مصدر للرسائل سواء اكان حياً او ميكانيكياً . ولولا ذلك لكانت كل الرسائل المصدرة مقررة سلفا بشكل كامل وقابلة للتنبؤ الدقيق .

يقابل الخيار الذي يمارسه مصدر الرسائل لدى توليده رسالة معينة ، درجة من الريبة لدى المستقبل يمكن حلها لدى تفحص الرسالة. ان هدف الاتصال ونتيجته الاولى تكمن في حل هذه الريبة او الدرجة من الريبة .

إذا لم ينطو مصدر الرسائل على اي خيار ، اي اذا لم يكن على سبيل المثال بمقدوره ان ينتج إلا سلاسل لا نهاية لها من عنصر مكرر هو الواحد ، او سلاسل لا نهاية لها من عنصر مكرر هو الصفر ، كان المستقبل بالمقابل في حل من اي التزام تجاه تفسير الرسالة وتفحصها لمعرفة محتواها ، إذ بامكانه في هذه الحالة وببساطة التنبؤ بها بشكل دقيق وكامل . وهكذا اذا كنا نرغب بقياس المعلومات بطريقة عقلية ، كان علينا تبني المعيار الذي يزيد بازدياد الخيارات المطروحة امام المصدر، اي المعيار الذي يزيد بازدياد ريبة المستقبل إزاء ما سيقوم المصدر بتوليده وبثه .

إن لكل مصدر بالطبع ، كمية من الرسائل الطويلة اكثر مما له من الرسائل القصيرة . فمثلاً هناك رسالتان ممكنتان تتألف كل واحدة منهما من رقم ثنائي واحد ، و٤ تتالف كل منها من رقمين ثنائيين ، و١٦ في كل منها ٤ ارقام ثنائية ، و٢٥٦ رسالة في كل رسالة ٨ ارقام ثنائية

وهكذا . هل من الواجب علينا ان نقول أن كمية المعلومات انما يقيسها عدد هذه الرسائل ؟ لنتصور اربعة خطوط برقية تستخدم بشكل آني لنقل الأرقام الثنائية وبنفس السرعة ، طبعاً نستطيع باستخدام هذه الخطوط ارسال كمية من الأرقام تساوي اربعة اضعاف ما يمكننا إرساله في حالة خط واحد . اذا كان الأمر كذلك ، اذن لوجب علينا قياس كمية المعلومات بدلالة عدد الأرقام الثنائية عوضاً عن عدد التراكيب المختلفة التي يمكن للأرقام الثنائية تشكيلها، وهذا يعني بالتالي أن كمية المعلومات يجب الا تقاس بعدد الرسائل الممكنة ، بل بلوغاريتم هذا العدد .

إن قياس كمية المعلومات كما تطرحه نظرية الاتصالات تؤمن ذلك ، وهو أمر منطقي اذا نظر اليه من جوانب اخرى ايضاً . يدعى مقياس كمية المعلومات بالانتروبي . اذا رغبنا بفهم الانتروبي كما تطرحها نظرية الاتصالات فعلينا تناسي الانتروبي التي تقدمها الفيزياء . وعندما نتفهم الانتروبي الخاصة بنظرية الاتصالات ، فلن يكون هناك اي ضير إذا حاولنا ربطها بإنتروبي الفيزياء ، وان كانت أدبيات الفيزياء تؤكد أن المغامرين الذين حاولوا ذلك لم يستطيعوا الخروج من الفوضى التي خلقها خلط الأفكار بين انتروبي الفيزياء وانتروبي الاتصالات .

تقاس انتروبي الفيزياء بواحدة البيت Bit . وهكذا نتحدث عن انتروبي مصدر رسائل معين على أنه مساو لكذا بيت لكل حرف ، او لكل كلمة ، أو لكل رسالة . اذا كانت سرعة توليد المصدر للرموز ثابتة، أمكننا القول أن هذا المصدر يملك انتروبي تساوي لكذا بيت في الثانية .

تزداد الانتروبي بازدياد عدد الرسائل التي يمكن للمصدر إجراء الخيار بينها ، وهي تزداد ايضاً بازدياد حرية الخيار (او بازدياد ريبة المستقبل) وتتناقص بازدياد الحدود المفروضة على حرية الخيار والريبة . فمثلاً حصر بعض الرسائل سواء بالإقلال من إرسالها او تكرارها كثيراً سينقص حرية الخيار لدى المصدر وكذا الريبة لدى المستقبل ، والنتيجة هي انخفاض الانتروبي .

لا شك سيكون امراً متميزاً ان نوضح الانتروبي اولاً بمثال . تعامل نظرية الاتصالات الرياضية مصدر الرسائل على انه مصدر مستقر حيث يتم إنتاج سلاسل من الإشارات هي الى حد ما غير قابلة للتنبؤ . يجب ان نتخيل المصدر وهو ينتقي إحدى الرسائل بوسائط غير قابلة للتنبؤ اي عشوائية ، ولعل ابسط شكل للتنبؤ ذاك الذي يفترض وجود رمزين فقط س ، ص يقوم المصدر وبشكل متكرر باجراء الخيار بينهما وبشكل مستقل أي ان الخيار الحالي غير مرتبط بالخيارات السابقة . لا نعلم في هذه الحالة إلاّ ان الرمز س يمكن أن ينختار باحتمال ح٠ ، وص يمكن ان ينختار باحتمال ح١ ، تماماً كما في حالة قذف قطعة نقد معدنية . يمكن للمستقبل ان يكتشف هذه الاحتمالات بتفحص سلاسل طويلة يولدها المصدر مكونة من هذين الرمزين س ، ص . يجب ان تبقى القيمتان ح٠ ، ح١ ثابتتين مع الوقت إذا كان المصدر مستقراً .

تساوي الانتروبي في هذه الحالة البسيطة :

ت = − (ح٠ لغ ح٠ + ح١ لغ ح١)   بيت لكل رمز

وهكذا تساوي الانتروبي المعاكس بالاشارة لمجموع حدين هما : احتمال اختيار الرمز س مضروباً بلوغاريتمه واحتمال اختيار الرمز ص مضروباً بلوغاريتمه .

ان السبب الحقيقي لتعريف الانتروبي على هذا النحو للحالة البسيطة وفي الحالات الاعقد لن يتضح مهما حاولنا بناء حجج معقولة ، وواقع الامر ان الوضوح المنشود لن يتحقق إلاّ من خلال تقدمنا المطرد في البحث ، لذا فان تبرير العلاقة الاخيرة سيؤجل الى مرحلة لاحقة . نستذكر أن اللوغاريتم يؤخذ بالنسبة لأسس مختلفة ، والاساس المعتبر للوغاريتم في نظرية المعلومات هو الاساس ٢ . يوضح الجدول التالي بعض خواص اللوغاريتم .

الكسر	طريقة ثانية في كتابته	طريقة ثالثة في كتابته	لوغاريتمه
$\frac{٣}{٤}$	$\frac{١}{٢^{٠ر٤١٥}}$	$٢^{-٠ر٤١٥}$	$-٠ر٤١٥$
$\frac{١}{٢}$	$\frac{١}{٢^{١}}$	$٢^{-١}$	-١
$\frac{٣}{٨}$	$\frac{١}{٢^{١ر٤١٥}}$	$٢^{-١ر٤١٥}$	$-١ر٤١٥$
$\frac{١}{٤}$	$\frac{١}{٢^{٢}}$	$٢^{-٢}$	-٢
$\frac{١}{٨}$	$\frac{١}{٢^{٣}}$	$٢^{-٣}$	-٣
$\frac{١}{١٦}$	$\frac{١}{٢^{٤}}$	$٢^{-٤}$	-٤
$\frac{١}{٦٤}$	$\frac{١}{٢^{٦}}$	$٢^{-٦}$	-٦
$\frac{١}{٢٥٦}$	$\frac{١}{٢^{٨}}$	$٢^{-٨}$	-٨

يعرف لوغاريتم العدد من الأساس ٢ على انه القوة التي إذا رفع عليها العدد ٢ حصلنا على العدد المعتبر .

لنتخيل مصدراً للرسائل ينطوي على قذف قطعة نقد معدنية . ولتكن س ممثلة (للطرة) وص ممثلة (للنقش) . عندها يتساوى الاحتمالان $ح_٠$ ، $ح_١$ ، ويكون : $ح_٠ = ح_١ = \frac{١}{٢}$ اي ان احتمال الطرة مثل احتمال النقش ويساوي كل من الاحتمالين $\frac{١}{٢}$.

تساوي الانتروبي في هذه الحالة ووفق علاقتنا السابقة :

ت = − (½ لع ½ + ½ لع ½)

= − (½ × −١ + ½ × −١)

= − (− ½ − ½) = ١ بيت لكل رمية لقطعة النقد .

اذا ولد مصدر الارسال سلسلة مكونة من (الطرة) و(النقش) ناجمة عن رمي قطعة النقد فإن الأمر يستلزم بيت واحدة من المعلومات لنقل رسالة تفيد عن ظهور الطرة او النقش .

لنلاحظ الآن اننا نستطيع تمثيل خرج (رميات متتالية لقطعة النقد بواسطة أرقام ثنائية تساوي في عددها عدد الرميات الواقعة ، ونختار ١ لتمثيل الطرة و ٠ لتمثيل النقش . وهكذا وفي هذه الحالة على الاقل ، يتساوى الرقم الدال على الانتروبي : ١ بيت لكل رمية مع الرقم الدال على الأرقام الثنائية اللازمة لتمثيل الخرج في كل رمية وهو ١ رقم ثنائي للرمية ، أي يتساوى في هذه الحالة عدد الأرقام الثنائية الضرورية لنقل الرسائل التي يولدها المصدر (تتالي الطرة والنقش) مع انتروبي المصدر.

نفرض الآن أن المصدر يولد سلسلة مكونة من ٠ و ١ باستخدام قطعة نقد خاصة تظهر النقش في ¾ الحالات والطرة في ¼ الحالات . يكون لدينا في هذه الحالة :

ح١ = ¾ ح٠ = ¼

ت = − (¼ لع ¼ + ¾ لع ¾)

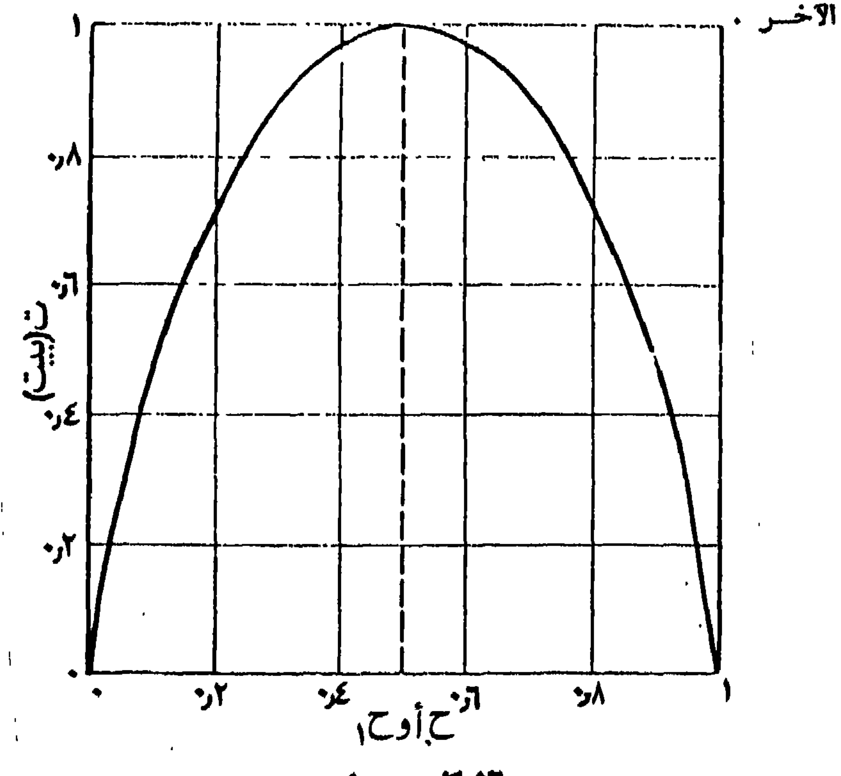
= − (¼ × −٢ + ¾ × −٠,٤١٥)

= ٠,٨١١ بيت لكل رمية

نشعر انه باستخدامنا قطعة النقد الخاصة هذه تزداد معرفتنا بالخرج بالمقارنة مع قطعة النقد السابقة . واكثر من ذلك ، فتقييدنا بالحصول على النقش باكثر من حصولنا على الطرة يقلل من الخيارات الممكنة التي توافرت عندما كان احتمال حصولنا على الطرة مساوياً لاحتمال حصولنا على النقش . يبدو ان هذا صحيح فعلاً لأنه اذا ارتفع احتمال النقش الى ١ وانخفض احتمال الطرة الى صفر ، لانعدمت الخيارات امامنا بشكل كامل . وكما رأينا في حالة قطعة النقد الخاصة

فإن الانتروبي تســاوي ٠ر٨١١ بيت لكل رمية . نتصور عنـد هذه المرحلة انه يجـب أن تتوفر لدينا القدرة على تمثيـل الخرج الخاص برميات قطعة النقد الخاصة المفترضة بعدد اقل من الأرقام الثنائية لكل رمية إلاّ انه ليس واضحاً كم يلزمنا من الأرقام الثنائية .

اذا كـان احتمال ورود النقش $ح_{١}$ ، كـان احتمـال ورود الطرة $ح_{٠} = ١ - ح_{١}$ وهكذا تتوقف معرفتنا لأحـد الاحتمالين على معرفتنا الاحتمال الآخر . يمكننا استناداً الى ذلك حساب قيم متعددة لـ ت مقابلة لقيم مختلفة لـ $ح_{١}$ ومن ثم توقيع منحنياً بيانياً يربط بين $ح_{١}$ ، ت . يوضح الشكل ٥ ــ ١ هذا المنحني حيث تصل ت الى قيمتها العظمى من اجل $ح_{١} = \frac{١}{٢}$ ، بينما تصبح ت مساوية للصفر من اجل قيمتين لـ $ح_{١}$ هما : ١ ، ٠ . أي عندما يقتصر الاصدار على أحد الرمزين دون الآخر .



الشكل ٥ ــ ١

لا يهم اذا اعتبرنا ان الرمز س هو الطرة وص هو النقش او العكس لذا يكون المنحني الممثل لارتباط ت مع ح هو نفسه الممثل لارتباط ت مع $ح_1$ وهذا ما يؤيده تناظر المنحني في الشكل ٥ ــ ١ بالنسبة للخط الشاقولي المنقــط .

يمكن لمصدر الارسال ان ينتج خيارات متتالية مــن بين الارقــام العشرية العشرة ، او من بين الاحرف الابجدية ، او من بين آلاف الكلمات من قاموس لغة معينة . نعتبر حالة توليد المصدر لرمز او كلمــة مــن بين عدد من الرموز او الكلمات مســاو لـ ن ، وباحتمالات مستقلة عــن الخيارات السابقة .

$$ت = - \sum_{م=1}^{ن} ح_م \text{ لع } ح_م \quad \text{بيت لكل رمز}$$

يعني الرمز $\sum$ هنا اجراء عملية الجمع لكل الحدود الناجمة عــن اعتبار كل قيم الحصول على الرمز الذي ترتيبه م . اذا فرضنا ن = ٢ فاننا نعود ببساطة الى الحالة المعتبرة سابقاً .

نضرب مثالا بهدف الايضــاح . نفرض اننا نرمي قطعتي نقد في وقت واحد ، واذ ذاك نحصل على اربع امكانات مختلفة للخرج نميزها بالاعداد ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ وفق ما يلي :

طــرة	طــرة	١
طــرة	نقش	٢
نقش	طــرة	٣
نقش	نقش	٤

وبذا يكون احتمال كل شكل من اشكال الخرج مســاويــاً $\frac{1}{4}$ ، وبالتالي تساوي الانتروبي في هذه الحالة :

$$ت = -(\tfrac{1}{4} \text{ لع } \tfrac{1}{4} + \tfrac{1}{4} \text{ لع } \tfrac{1}{4} + \tfrac{1}{4} \text{ لع } \tfrac{1}{4} + \tfrac{1}{4} \text{ لع } \tfrac{1}{4})$$

= − (− $\frac{١}{٤}$ − $\frac{١}{٤}$ − $\frac{١}{٤}$ − $\frac{١}{٤}$) = ٢ بيت لكل رمية مزدوجة يحتاج الامر كمية من المعلومات تساوي ٢ بيت لتوصيف او نقل خرج عملية رمي قطعتي نقد في وقت واحد . وكما في حالة رمي قطعة نقد واحدة يتساوى فيها احتمال ورود الطرة مع احتمال ورود النقش ، نستطيع في حالتنا الجديدة هذه استخدام رقمين ثنائيين لتوصيف خرج رمي القطعتين اذ نربط رقم ثنائي بكل قطعة على حدة . يفضي كل هذا الى امكانية بث الرسالة المولدة في حالتنا هذه (رمي قطعتي النقد) باستخدام عدد من الارقام الثنائية مساو للانتروبي .

اذا توفر لدينا مجموعة من الرموز عددها ن متكافئة في احتمال ظهورها ، كان ذلك الاحتمال مساوياً $\frac{١}{ن}$. يكون لدينا في هذه الحالة عدد من الحدود يساوي ن ، حيث يساوي كل حد بدوره الى $\frac{١}{ن}$ لع $\frac{١}{ن}$

$$\text{ت} = -\ \text{لع}\ \frac{١}{\text{ن}} = \text{لع ن} \quad \text{بيت لكل رمز}$$

مثلا عندما نرمي حجر النرد ، يتساوى احتمال ظهور اي من وجوهه مع احتمال ظهور اي وجه آخر ، وهذا الاحتمال هو $\frac{١}{٦}$ ، وتكون الانتروبي في هذه الحالة − لع $\frac{١}{٦}$ = ٢٫٥٨ بيت لكل رمية .

وبصورة عامة نفترض اننا اخترنا في كل مرة وباحتمالات متساوية عددا ثنائيا من مجموعة اعداد ثنائية يتكون كل منها من هـ رقم ثنائي .

ولما كان هناك $٢^{\text{هـ}}$ من هذه الاعداد ، نحصل على :

$$\text{ن} = ٢^{\text{هـ}} \qquad \text{لع}\ \frac{١}{\text{ن}} = \text{لع}\ \frac{١}{٢^{\text{هـ}}} = \text{لع}\ ٢^{-\text{هـ}} = -\ \text{هـ}$$

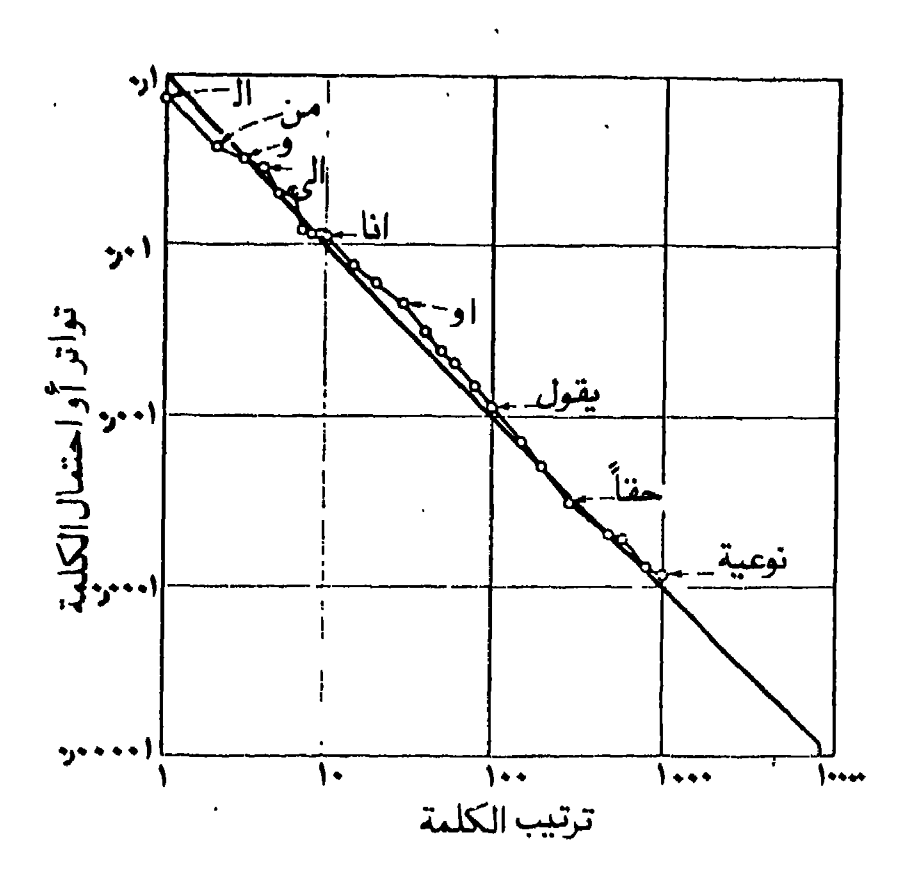
وهكذا فمن اجل مصدر يولد عند كل خيار وبنفس الاحتمال عـددا ثنائيا مكونا من (هـ) رقم ثنائي ، تكون الانتروبي مساوية لـ هـ بيت لكل عدد . ان الرسالة التي يولدها المصدر هنا عبارة عن عدد ثنائي يمكن تمثيله بالطبع بأرقام ثنائية ؛ وايضا تمثل هذه الرسالة بعدد من الارقام الثنائية يساوي لانتروبي الرسالة مقاسة بالبيت . يوضح هذا المثـال كيف ان على اللوغاريتم ان يكون التابع الرياضي ذي الـدور الرئيسي في تعريـف الانتروبي .

تختلف في الحالة العادية ، احتمالات توليد المصدر للاشارات باختلاف الاشارة المولدة . نأخذ كمثال مصدرا مرسلا يولد الكلمات من اللغـة الانكليزية بحيث يستقل ورود كل كلمة جديدة عما قبلها ولكن بالاخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورود الاحرف في النصوص الانكليزية وهو ما أشرنـا اليه على انه التقريب الاول في الفصل الثالث .

اذا رتبنا كلمات الانكليزية وفق تواتر ورودها الشائع ، تقع الكلمات الاكثر تواترا في المقام الاول أي تعطى الرقم ١ مثل كلمات (the, in fact) بينما الكلمات التالية في التواتر تعطى الرقم ٢ مثل كلمة of ، وهكذا فاحتمال الكلمة ذات الترتيب ر (اذا لم تكن ر كبيرة جدا) هو :

$$ح_ر = \frac{١}{١٠ ر}$$

يوضح الشكل ٥ ــ ٢ المخطط البياني لهذه العلاقة النظرية ممثلا بالخط الأسود الممتد من اعلى اليسار الى اسفل يمين الشكل ، كما يوضح التقارب الشديد بين هذا الخط النظري والنقاط الموقعة بشكل تجريبي ، وتعرف هذه العلاقة باسم علاقة زيبف وسنتعرض لها في الفصل السابع ، بينما سنكتفي هنا باستخدامها .



الشكل ٥ ــ ٢

نستطيع أن نبرهن على أن هذه العلاقة ليست صحيحة بالنسبة لكل الكلمات ، ويتضح ذلك اذا اعتبرنا رمي قطعة النقد المعدنية اذا تساوى احتماله ظهور الطرة والنقش وكان كل منهما مساوياً $\frac{1}{2}$ ، فلن يكون هناك خرج ممكن آخر لأن $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$. اما اذا كان احتمال أن تقف قطعة النقد على حافتها غير مساوي للصفر ، كان يساوي $\frac{1}{10}$

مثلا ، فنتوقع عندها أنه في حالة ١٠٠ رمية يمكن ان تظهر الطرة في ٥٠ من الحالات وان يظهر النقش في ٥٠ حالة اخرى ، وان تقف القطعة على حافتها في عشرة حالات . يظهر هذا وكأنه مضحك ، اذ يجب ان يكون مجموع كل الاحتمالات مساوياً الواحد . لنلاحظ انه اذا أضفنا الاحتمالات التي تعطيها العلاقة السابقة : ح١ ثم ح٢ ثم .... ح فسنجد ان المجموع سيصبح مساوياً الواحد عند اضافة ٨٧٢٧ . اذا قبلنا هذه الحقيقة كما هي ، فنصل الى نتيجة مفادها أنه لا يمكننا ان نستخدم اي كلمة بعد ذلك . وواقع الامر ان العلاقة الاخيرة تقريبية الى حد ما .

ومهما يكن من امر فالخطأ المرتكب ليس كبيرا ، وقد استخدم شانون هذه العلاقة في حساب الانتروبي الخاصة بمصدر رسائل يولد الكلمات بشكل مستقل ولكن بالاخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورودها في النصوص الانكليزية ، ولكي يحافظ على القيمة النظرية لمجموع الاحتمالات وهي ١ ، فقد اعتبر الكلمات الـ ٨٧٢٧ الاكثر شيوعاً في اللغة الانكليزية وحسب الانتروبي استنادا لذلك فوجدها مساوية لـ ١٤ر٩ بيت لكل كلمة .

وجدنا في الفصل الرابع انه يمكن ترميزالنصوص الإنكليزية حرفاً بحرف باستخدام ٥ ارقام ثنائية لكل حرف أو ٥ر٢٧ رقم ثنائي لكل كلمة ، كما استعرضنا كيفية استخدام السلاسل المختلفة من الارقام الثنائية لترميز ١٦٣٥٧ كلمة و ٢٦ حرف وفراغ واحد ، وأن توظيف ١٤ رقم ثنائي لكل كلمة يفي بفرض ترميز النصوص الإنكليزية . يصل بنا ذلك الى حالة من التشكيك فيما اذا كانت الانتروبي تعطي فعلا عدد الارقام الثنائية اللازمة ، إذ كما اسلفنا ، يشير حساب شانون المستند الى الاحتمالات النسبية لكلمات اللغة الإنكليزية الى أن ١٤ر٩ رقم ثنائي لكل كلمة يكفي فعلا .

اما خطوتنا التالية في طريق اكتشاف عدد الارقام الثنائية اللازمة لترميز رسالة يولدها مصدر مرسل فتتضمن عرض نظرية مدهشة برهنها شانون تتعلق بالمصادر المستقرة حيث تجري خيارات مستقلة وفق احتمالات معينة للاحرف او الكلمات .

نعتبر كل الرسائل التي يمكن للمصدر أن يولدها والتي تتألف من عناصر معينة تضم عدداً كبيراً من الاحرف . مثلا الرسائل التي تتكون كل منها . . . ١٠٠ رمز (احرف ، كلمات ، . . . الخ) ، وبصورة أعم الرسائل المكونة من ن حرف . إن بعض هذه الرسائل محتمل أكثر من الرسائل الاخرى . يرد الرمز الاول في الرسائل المحتملة : ح$_{١}$ × ن ، بينما يرد الرمز الثاني ح$_{٢}$ × ن وهكذا . اذن يرد كل رمز في الرسائل المحتملة وفق التواتر المميز للمصدر . وعلى الرغم من ذلك فيمكن المصدر توليد أنواع اخرى من الرسائل ، كأن يصدر رسالة مكونة من رمز واحد مكرر بشكل لا نهائي ، او ان يصدر الرموز بغير تواترات ورودها المشار اليها ، إلاّ أن هذا المصدر قلما يفعل ذلك .

ان الحقيقة الهامة هي انه إذا كانت ت هي انتروبي المصدر ، فسيكون هناك بالضبط حوالي ٢$^{ت ن}$ رسالة محتملة ، اما الرسائل المتبقية الاخرى فسيكون احتمال ورودها صغيراً بدرجة يمكن اهماله . وبعبارة أوضح ، اذا صنفنا الرسائل من أكثرها احتمالا الى أدناها احتمالا ، وربطنا بالرسائل الاكثر احتمالا التي عددها ٢$^{ت ن}$ أعداداً ثنائية عددها ت ن ، فسنكون على يقين من أن كل رسالة مكونة من ن رمز سيولدها المصدر بشكل فعلي لا شك سيقابلها عدد معين .

نلجأ لتوضيح هذه الافكار الى حالات خاصة بسيطة . نفرض ان الرموز المنتجة هي ٠ ، ١ . إذا تساوى احتمال هذين الرمزين وكان كل منهما مساوياً $\frac{١}{٢}$ ، كانت الانتروبي كما رأينا مساوية لـ ١ بيت لكل رمز . نفرض أن المصدر يولد رسائل يساوي طولها ١٠٠٠ رقم ٢ فيكون الجداء ن ت = ١٠٠٠ ووفق نظرية شانون يجب ان يكون هناك ٢^{١٠٠٠} رسالة محتملة .

ان استخدام ١٠٠٠ رقم ثنائي يمكننا من كتابة $٢^{١٠٠٠}$ عدد ثنائي . وهكذا فلتحديد رقم ثنائي مختلف لكل رسالة محتملة علينا استخدام أعداد ثنائية يتكون كل منها من ١٠٠٠ رقم ثنائي . وهـذا ما توقعناه بالضبط . فلكي نحدد للمستقبل اي الأعداد الثنائية المكونة من ١٠٠٠ رقم ثنائي يقوم المصدر بتوليدها ، علينا بث رسـالة مكونة من ١٠٠٠ رقـم ثنـائي .

نفرض ان الأرقام المكونة للرسائل التي يولدها مصدر الرسائل يتم اختيارها إثر رمي قطعة نقد احتمال الطرة فيها ¾ واحتمال لنقش ¼ ، وهكذا فالرسائل النموذجية المتولدة عن هذا المصدر تحوي من الـ ١ أكثر مما تحوي من الـ ٠ ، إلاّ ان هذا ليس كل ما في الامر . رأينا ان الانتروبي في هذه الحالة هي ٨١١ر٠ بيت لكل رمية ، وإذا اعتبرنا ن مرة اخرى مساوية لـ ١٠٠٠ ، اي ان طول كل رسالة هو ١٠٠٠ رقم ثنائي ، فيكون الجداء ن ت مساوياً لـ ٨١١ ، وبينما كان عدد الرسائل الممكنة سابقاً هو $٢^{١٠٠٠}$ اصبح في هذه الحالة $٢^{٨١١}$ فقط .

ان استخدام ٨١١ رقم ثنائي يمكننا من كتابة $٢^{٨١١}$ عدد ثنائي حيث نستطيع ربط كل واحد من هذه الاعداد لكل رسالة ممكنة قوامها ١٠٠٠ رقم ثنائي تاركين الرسائل الغير ممكنة والتي عددها ١٠٠٠ دون ترقيم . وهكذا يمكننا ان نرسل الى المستقبل ما يدله على الرسالة ذات الطول ١٠٠٠ رقم التي يولدها المصدر ببث ٨١١ رقم ثنائي فقط . ويبقى احتمال ان يولد المصـدر احدى الرسائل غير المحتملة مهملا بدرجـة كافية . لا نستطيع تقديم ضمانات مطلقة فيما يخص معالجاتنا حتى الآن ، فمصدر الرسائل قد يولد رسالة غير مقرونة بعدد من بين أعدادنا الـ $٢^{٨١١}$ المكونة من ٨١١ رقم ثنائي . لا نستطيع في هذه الحالة بث الرسالة على الاقل باستخدام ٨١١ رقم ثنائي .

نصادف مرة اخرى ما يؤكد لنا ان عدد الأرقام الثنائية اللازمة لبث رسالة ما يساوي حاصل ضرب الانتروبي مقدرة بالبيت لكل رمز في عدد الرموز . يجدر بنا ان نتذكر أننا حققنا في ايضاحنا الاخير بثاً اقتصادياً بترميز التراكيب ، اي باعتبار رسالة من الف رقم واكثر ومن ثم ترميزها برمز خاص ، وكذلك ترميز الرسائل المماثلة باستخدام ٨١٠١ رقم ثنائي .

ما مدى صحة هذا الافتراض ؟

لقد عالجنا حتى الآن الحالات التي يولد فيها مصدر الارسال الرموز المختلفة (اعداد ، احرف ، كلمات) بشكل مستقل عن الرموز التي ولدها في مرحلة سابقة . ان هذا الاسلوب لا يتفق وطريقة انشاء النصوص اللغوية ، فالى جانب القيود الاحصائية على تواتر الكلمات ، هناك قيود اخرى على ترتيب الكلمات ، لذا سيكون الخيار امام الكاتب عند كتابته كلمة جديدة اقل مما لو كانت الفرصة متاحة امامه لانتقاء هذه الكلمة بشكل مستقل عما سبقها .

كيف يمكن ان نعالج مثل هذه الحالة . نجد مفتاح الحل في طريقة ترميز التراكيب التي شرحناها في الفصل الرابع والتي استعدناها مرة ثانية في المثال الاخير . اذا كان المصدر مستقراً فيعتمد الحرف التالي على واحد او أكثر من الاحرف الخمسة السابقة وليس على الاحرف التي تسبق هذه المجموعة . يوضح التقريبان الثاني والثالث المقدمان في الفصل الثالث كيفية توليد نص وفق هذه الطريقة . اذا اعتبرنا عملية مستقرة ما اي عملية المسؤول الاول فيها هو مصدر مستقر ، وكانت تلك العملية من النوع القابل للنمذجة الرياضية ، لوجب ان يكون تاثير الماضي على الرموز الجديدة المتولدة متناقصاً كلما كان ذلك الماضي ابعد . ينطبق ذلك على توليد النصوص اللغوية ، وعلى الرغم من انه يمكننا تصور حدوث العكس (كأن نستخدم نفس الاسم لشخصيات رواية ما) ، فان الكلمات التي اكتبها الآن تعتمد على ما كتبته سابقاً قبل عشرة آلاف كلمة من موقع الكلمة المعنية .

نفرض الآن اننا نجزىء الرسالة قبل ترميزها الى تراكيب طويلة من الرموز . اذا كانت هذه التراكيب طويلة بما فيه الكفاية فسيقتصر تاثير الرموز من تركيب سابق على الرموز الاولى فقط من التركيب التالي ، واذا زدنا في طول التراكيب كثيراً ، فان عدد الرموز المتأثرة تلك سيكون مهملاً بالمقارنة مع عدد الرموز في كل تركيب . يؤهلنا ذلك لحساب انتروبي كل تركيب ولتحقيق هذا الحساب نفرض احتمال التركيب ذي الترتيب م هو : $ح(ب_م)$ ، و ستكون الانتروبي معطاة بالعلاقة :

$$ت = -\sum_{م} ح(ب_م) \times لع\ ح(ب_م) \quad \text{بيت لكل تركيب}$$

سيعترض اي رياضي على تسمية هذه الكمية بالانتروبي ، وبدلاً من ذلك سيقول انها ستقترب من الانتروبي بازدياد طول التراكيب ، اي بتضمينها اعداداً أكبر من الرموز . لذا علينا ان نفترض أننا سنزيد من طول التراكيب لنقترب اكثر واكثر من القيمة الحقيقية للانتروبي . وفي اطار هذا الشرط نستطيع أن نحسب الانتروبي لكل رمز ، بأن تقسم الانتروبي على عدد الرموز الواردة في التراكيب ن ، أي :

$$ت\,(\text{للرمز}) = \frac{1}{ن} \sum_{م} ح(ب_م) \times لع\ ح(ب_م) \quad \text{بيت لكل رمز}$$

تؤدي حسابات الانتروبي في غالبية الاحيان الى قيم عالية اذا لم تأخذ بعين الاعتبار العلاقات بين الرموز وهكذا اذا زدنا ن في العلاقة الاخيرة بشكل مطرد اقتربنا باستمرار من القيمة الحقيقية للانتروبي .

لقد قررنا منذ البداية ان تعريف كمية المعلومات يجب أن يتسق مع فكرة بث عدة رسائل منفصلة عبر أسلاك مختلفة بحيث تساوي الكمية الاجمالية للمعلومات المرسلة مجموع الكميات المرسلة عبر كل سلك على حدة . وهكذا فللحصول عى الانتروبي بجملة مصادر مستقلة عاملة في نفس الوقت ما علينا الا جمع الانتروبي لكل مصدر . نذهب

ابعد من ذلك ونفترض ان المصدر يعمل بشكل متقطع عندها يجب أن نضرب سرعة انبثاق المعلومات عنه او الانتروبي الخاصة به بالنسبة المئوية لوقت عمله وذلك بغية الحصول على قيمة وسطية لسرعة اصداره للمعلومات .

نفرض جدلاً انه لدى ارسالنا سلسلة من الاحرف التكليزية مثل TH كان لدينا مصدر ارسال وحيد . يكون احتمال ورود الحرف E في الاصدار التالي عالياً جداً في هذه الحالة . وقد اصبح لدينا مصدر ارسال آخر عند بثنا لزوج الاحرف NQ . يكون احتمال ورود الحرف U في هذه الحالة مساوياً الواحد . لنحسب الانتروبي لكل من هذين المصدرين . نشير الى انتروبي كل مصدر بالرمز $\text{ب}_{\text{م}}$ ، ثم نضرب هذه الانتروبي بالعدد $\text{ح}(\text{ب}_{\text{م}})$ الدال على احتمال عمل ذلك المصدر (أي بنسبة الفترة التي يعمل ذا لكالمصدر خلالها) ثم نجمع كل الارقام الناتجة لنحصل على متوسط الانتروبي او اجمالي سرعة المصدر الذي هو عبارة عن اتحاد عدة مصادر يعمل كل منها لفترة زمنية محددة . نعتبر كمثال مصدراً ينطوي على احتمالات ازواج فقط ، اي ان مجمل تأثير الماضي ينحصر في الحرف الاخير الصادر فلكل حرف تواتر وروده كالحرف E يتواتر ١٣ ٪ ؛ وكالحرف W تواتر وروده ٢ ٪ .

نصيغ كل ما تقدم في لغة رياضية متماسكة فنفرض ان تركيباً معيناً مكوناً من ن رمز قد تم توليده من قبل المصدر ، فاذا رمزنا لهذا التركيب بالرمز $\text{ب}_{\text{م}}$ نصطلح على احتمال ان يكون الرمز التالي هو س بالرمز

$$\text{ح}_{\text{ب}_{\text{م}}}(\text{س}_{\text{ل}})$$

يعتبر هذا المصدر عاملاً فقط عندما يصدر تركيب ما عنه ، تساوي الانتروبي الخاصة به في هذه الحالة :

$$- \sum_{\text{ل}} \text{ح}_{\text{ب}_{\text{م}}} (\text{س}_{\text{ل}}) \; \text{لغ} \; \text{ح}_{\text{ب}_{\text{م}}} (\text{س}_{\text{ل}})$$

حيث اعتبرنا هنا صدور التركيب $\text{ب}_{\text{م}}$ المكون من ن رمز وتم اجراء الجمع لكل الرموز بدءاً من ل = ١ وحتى ل = ن .

ولكن ماهي نسبة الفترات التي يعمل خلالها هذا المصدر . تعتبر بالنسبة لهذا المصدر فترة عمل تلك الفترة التي يصدر خلالها تركيب مكون من ن رمز وليس أي نوع آخر من التركيب . وهكذا اذا دعونا احدى هذه الفترات الخاصة بالتركيب $\text{ب}_{\text{م}}$ بتسمية مثل $\text{ح} (\text{ب}_{\text{م}})$ ، واخذنا بعين الاعتبار كل التراكيب المكونة من ن رمز ، نحسب مجموع الانتروبي لكل منها على حدة ، ونعتبر توليد كل تركيب على أنه مصدر بالتركيب الخاص $\text{ب}_{\text{م}}$ من ن رمز الذي سبق اختيار الرمز $\text{س}_{\text{ل}}$) ، تكون الانتروبي المطلوبة :

$$\text{ت}_{\text{ن}} = - \sum_{\text{م} ، \text{ل}} \text{ح} (\text{ب}_{\text{م}}) \, \text{ح}_{\text{ب}_{\text{م}}} (\text{س}_{\text{ل}}) \; \text{لغ} \; \text{ح}_{\text{ب}_{\text{م}}} (\text{س}_{\text{ل}})$$

يعني ارتباط الرمزين م ، ل اشارة التجميع مساهمة كل الحدود المذيلة بأحد الدليلين م ، ل في المجموع المذكور .

اذا زدنا عدد الرموز ن السابقة للرمز $\text{س}_{\text{ل}}$ بحيث يصبح كبيرا جدا تقترب القيمة $\text{ت}_{\text{ن}}$ بشكل مطرد من انتروبي المصدر . واذا لم يكن هناك اي تاثيرات احصائية صادرة عن مصادر تبعد عن الرمز المعتبر بأكثر من ن رمز كانت $\text{ت}_{\text{ن}}$ هي قيمة الانتروبي الحقيقية (تصح هذا الحالة من اجل مصدر يولد الازواج وقمية ل ن = ١ ، أو مصدر يولد التراكيب الثلاثية وقيمة ل ن = ٢) .

يكتب شانون العلاقة الاخيرة بشكل مختلف قليلا . ان حاصل ضرب احتمال اصدار التركيب المعني ح (ب) في احتمال ورود الرمز

$س_ل$ بعد التركيب ب : $ح_{ب_م}(س_ل)$ يساوي احتمال اصدار التركيب $ب_م$ متبوع بالرمز $س_ل$ وهو وفق شانون : $ح(ب_م ، س_ل)$ ، وبهذا تصبح العلاقة الاخيرة على الشكل :

$$ت = - \sum_{م ، ل} ح(ب_م ، س_ل) \; لع \; ح_{ب_م}(س_ل)$$

اعتبرنا في الفصل الثالث الالة المتناهية الحالات كتلك التي وضحها الشكل ٣ — ٣ ، كمصدر للنصوص . يمكننا ان نستند في حساب الانتروبي الى هذه الآلة حيث نعتبر كل حالة من حالاتها كمصدر للرسائل ونحسب الانتروبي المقابلة ، ثم نضربها باحتمال ان تصبح الالة في تلك الحالة وتجمع كل الحدود المماثلة لنحصل على القيمة الاجمالية للانتروبي

ننتقل الى الصياغة الرمزية لهذه الافكار . نفرض انه عندما تكون الآلة في الحالة م ، يكون بمقدورها أن تصدر الرمز ل باحتمال مقداره $ح_م(ل)$ ، فاذا كانت الآلة مثلا في الحالة التي نرمز لها بالعدد ١٠ فقد يكون بمقدورها اصدار الرمز : ل = ٣ باحتمال قدره ٣ ٪ وهكذا نكتب :

$$ح_{١٠}(٣) = ٣٪$$

تساوي الانتروبي الكلية للحالة م للآلة مجموع كل انتروبي مقابلة لاصدار رمز معين ل اي :

$$ت_م = - \sum_{ل} ح_م(ل) . لع \; ح_م(ل)$$

نصطلح الآن على ان للآلة احتمال $\text{ح}_{\text{م}}$ أن تكون في الحالة م ، وهكذا تكون انتروبي الآلة لكل رمز ، على اعتبار ان الآلة مصدر للرموز :

$$\text{ن} = \text{مج}_{\text{م}}\ \text{ح}_{\text{م}}\ \text{ت}_{\text{م}} \qquad \text{بيت لكل رمز}$$

نعيد كتابة ذلك بالشكل التالي :

$$\text{ن} = -\ \text{مج}_{\text{م، ل}}\ \text{ح}_{\text{م}} \times \text{ح}_{\text{م}}(\text{ل}) \times \text{لع}\ \text{ح}_{\text{م}}(\text{ل}) \ \text{بيت لكل رمز}$$

مرة اخرى ، يعني ارتباط الدليلين م ، ل باشارة المجموع مساهمة كل الحدود المذيلة بهذين الدليلين في المجموع المذكور .

لقد حققنا وبغاية البساطة النقلة من حساب الانتروبي لحالة مصدر يولد الرموز بشكل مستقل الى حالة مصدر يولد الرموز معتمدا في توليده لكل رمز على ما سبق من الرموز ، كما استعرضنا بدائل ثلاثة لحساب أو تعريف الانتروبي الخاصة بمصدر مرسل ، حيث تتكافىء هذه البدائل وهي ذات صحة مقبولة في حالة المصادر المستقرة . علينا ان نتذكر في هذا المعرض أن مصادر النصوص اللغوية تعتبر وبشكل تقريبي مصادر مستقـرة .

ليس تعريف الانتروبي لكل رمز بالشكل المتكامل السابق نهاية المطاف اذ تبرز مشكلة أهم وهي كيف نربط تلك الانتروبي بشكل واضح مع عدد الارقام الثنائية لكل رمز اللازمة لترميز الرسالة .

لقد رأينا ان تجزئة الرسالة في تراكيب من الاحرف او الكلمات ومعاملة كل تركيب كرمز يمكننا من حساب الانتروبي لكل تركيب باستخدام العلاقة الخاصة بحساب الانتروبي لكل رمز على حدة ، وان زيادة حجم التراكيب تقربنا اكثر واكثر من انتروبي المصدر .

تنحصر المشكلة اذن في اكتشاف طريقة الترميز الفعال باستخدام الارقام الثنائية لسلاسل الرموز المنتقاة من زمرة كبيرة جدا من الرموز ، حيث يحكم اختيار كل رمز احتمال معين . اوضح شانون وفانو كيفية اجراء مثل هذا الترميز المطلوب ، بينما هوفمان طريقة احسن سنستعرضها فيما يلي .

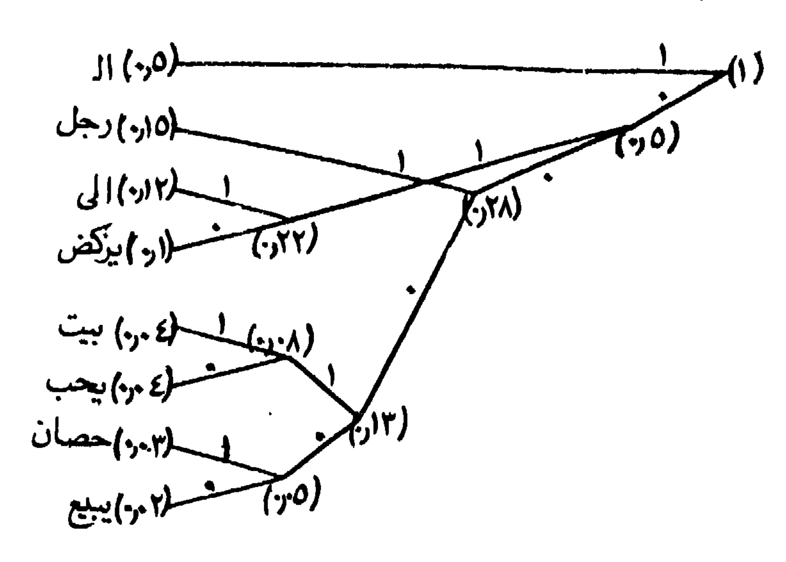
سندرج بهدف الايضاح كل الرموز الممكنة وفق احتمالاتها المتناقضة نفرض ان هذه الرموز هي الكلمات التالية : الـ ، رجل ، الى ، يركض ، بيت ، يحب ، حصان ، يبيع والتي ترد بشكل مستقل وفق احتمالات محددة لدى اختيارها . يوضح الجدول التالي هذه الرموز مع احتمالاتها :

الكلمة	الاحتمال
الـ	٥٠٪
رجل	١٥٪
الى	١٢٪
يركض	١٠٪
بيت	٠٤٪
يحب	٠٤٪
حصان	٠٣٪
يبيع	٠٢٪

نحسب الانتروبي لكل كلمة باستخدام علاقاتنا السابقة فنجد انها ٢١ر٢ بيت لكل كلمة . اذا ربطنا بكل كلمة احد الاعداد الثنائية الثمانية المكون كل منها من ثلاثة ارقام ثنائية ، لاحتجنا بالتالي لثلاثة ارقام بهدف بث كل كلمة . كيف يمكن ان ترمز الكلمات بشكل اكثر فعالية .

يوضح الشكل ٥ ــ ٣ اكثر الطرق فعالية لترميز الرسالة كلمة بكلمة ندرج الكلمات على يسار الشكل ونضع الاحتمالات بين أقواس . نختار أولا الاحتمالين الادنى كمرحلة اولى لانشاء الترميز المطلوب : يبيع ٢٪ ، حصان ٠٣ر. ، ثم نرسم خطين باتجاه النقطة ٠٥ر. وهي احتمال يبيع

او حصان . نضع جانبا بعد ذلك الاحتمالات المفردة التي تم ربطها بخطوط ونحدد الاحتمالين الادنى اللذين لم يرتبطا بعد بخطوط وهما هنا : ٠ر٠٤ (يحب) و ٠ر٠٤ (بيت) . نرسم خطين الى نقطة ٠ر٠٨ وهي مجموع ٠ر٠٤ و ٠ر٠٤ . نستعرض الان الاحتمالات المتبقية مع الاحتمالين الجديدين المتولدين ٠ر٠٥ ، ٠ر٠٨ ، فيكون ادنى احتمالين هما ٠ر٠٥ ، ٠ر٠٨ لذا نصلهما بخطين الى النقطة ٠ر١٣ . نتابع بهذا الشكل حتى تنتهي كل الخطوط الى نقطة مشتركة في اقصى اليمين وهي النقطة التي نشير اليها بالرقم ١ .



الشكل ٥ ــ ٣

نبدا بعد ذلك من هذه النقطة الاخيرة ونتحرك نحو اليسار واضعين الرقم ١ على كل خط متفرع من اي نقطة جهة الاعلى والرقم . على خط متفرع من نفس النقطة جهة الاسفل . نحصل اخيرا على الترميز المطلوب لكل كلمة وهو عبارة عن سلسلة الارقام التي نواجهها لدى انطلاقنا من النقطة ١ باتجاه الكلمة المعتبرة .

ندرج فيما يلي ترميز كل كلمة :

الكلمة	الاحتمال: ح	الرمز	عدد الارقام في الرمز ن	حاصل الضرب ن × ح
ال	٥٠٪	١	١	٥٠٪
رجل	١٥٪	٠٠١	٣	٤٥٪
الى	١٢٪	٠١١	٣	٣٦٪
يركض	١٠٪	٠١٠	٣	٣٠٪
بيت	٠٤٪	٠٠٠١١	٥	٢٠٪
يحب	٠٤٪	٠٠٠١٠	٥	٢٠٪
حصان	٠٣٪	٠٠٠٠١	٥	١٥٪
يبيع	٠٢٪	٠٠٠٠٠	٥	١٠٪
				٢٫٢٦

يعطي حاصل ضرب احتمال ورود الكلمة في عدد الارقام المتضمنة في رمزها العدد الوسطي للارقام في كل كلمة محتواة في رسالة طويلة والناجم عن ورد تلك الكلمة . يساوي مجموع . حواصل الضرب المذكورة ٢٫٢٦ ، وهذا هو اكبر بقليل من الانتروبي المحسوبة لكل كلمة والتي وجدناها ٢٫٢١ بيت لكل كلمة ، الا ان هذا المجموع اقل من عدد الارقام التي يمكن ان نستخدمها لتمثيل كل كلمة والمساوي لـ ٣ ارقام .

لا تقتصر ميزات طريقة هوفمان على انها الطريقة الاكثر كفاءة لترميز مجموعة من الرموز لها احتمالات مختلفة ، بل يمكننا ان نبرهن ان ما تستلزمه من ارقام يزيد بقليل عن قيمة الانتروبي (كانت الزيادة في مثالنا ٠٫٠٥ من الرقم الثنائي لكل رمز) ، وان هذه الزيادة لا قيمة لها البتة .

نفرض اننا نقوم بدمج الرموز قبل ترميزها في تراكيب مكونة من رمز ، اثنين ، ثلاثة ، او اكثر . سيرتبط بكل من هذه التراكيب احتمال معين (يساوي في حالة الخيار المستقل للرموز حاصل ضرب الرموز المنتقاة لانشاء سلسلة معينة) . يمكننا استخدام طريقة هوفمان لترميز هذه

التراكيب . عندما نزيد حجم التراكيب ، يزيد بالمقابل عدد الارقام الثنائية الممثلة لكل تركيب . الا ان طريقة هوفمان تستدعي من الارقام الثنائية لكل تركيب ما يزيد قليلا عن الانتروبي . وهكذا ان الازدياد المطرد لعدد الارقام الثنائية المستخدمة لترميز تركيب معين والناتج عن ازدياد عدد الرموز في كل تركيب ، سيؤدي عندما يبلغ طول الرمز حدا كبيرا جدا الى اهمال الجزء البسيط للغاية الذي يعرف عدد الرموز في طريقة هوفمان عن الانتروبي ، وستتساوى في النهاية الانتروبي مع عدد هوفمان .

نتصور قناة اتصال يمكنها بث عدد من نبضات القطع والفصل مساوي لـ ص في كل ثانية يمكن لهذه القناة امرار ص رقم ثنائي . اذا كانت ت هي انتروبي مصدر الرسائل مقاسة بالبيت في كل ثانية ، وكانت ت اقل من ص ، فان استخدام طريقة هوفمان سيمكن من ارسال الاشارات المرمزة عبر هذه القناة .

لا تمرر كل الاقنية الارقام الثنائية ، فبعض الاقنية مثلا تسمح بثلاثة نبضات من شدات مختلفة ، او نبضات مختلفة باطوال مختلفة كشيفرة مورس مثلا . نستطيع بذلك تصور قناة واحدة وقد وصلت الى عدة مصادر للرسائل لكل منها انتروبي خاصة وسرعة اصدار للمعلومات ونختار منها المصدر ذي الانتروبي الاعظمية ونسمي هذه الانتروبي سعة القناة ونرمز لها بالرمز ص ، تقاس طبعا بالبيت في الثانيــة .

يفضي استخدام طريقة هوفمان الى ترميز خرج القناة عندما تبث رسالة ذات انتروبي اعظمية باستخدام اقل عدد ممكن من الارقام الثنائية في الثانية ، وعندما تعتبر رسائل ممتدة مرمزة في سلاسل ممتدة مــن الارقام الثنائية ، يلزم عدد من الارقام الثنائية قريب جدا ، لـ ص لتمثيل الاشارات العابرة للقناة .

يمكن استخدام اسلوب الترميز هذا باتجاه معاكس ، اذ قد نلجأ لترميز عدد من الارقام الثنائية مساوي لـ ص في كل ثانية وارسالها عبر القناة وهكذا نستطيع ترميز مصدر ذي انتروبي ت باستخدام ت رقم ثنائي في الثانية ، وامرار ص بيت في كل ثانية عبر قناة منعزلة سعتها ص .

لقد اصبحنا الآن في وضع يمكننا من تقديم واحدة من اهم النظريات المرتبطة بنظرية المعلومات . دعاها شانون بالنظرية الاساسية للاقنية . الخالية من الضجيج ، وصاغها على النحو التالي :

نفرض مصدرا ذي انتروبي ت بيت لكل رمز وقناة سعتها في الارسال ص بيت في الثانية . يمكن في اطار هذا الافتراض ترميز خرج المصدر بحيث يبث بسرعة وسطية مقدارها ($\frac{ص}{ت}$ ـ هـ) رمز في الثانية عبر القناة حيث هـ كمية صغيرة للغاية ، ولا يمكن ان يبث بسرعة وسطية تتجاوز القيمة $\frac{ص}{ت}$.

نعيد عرض هذه النظرية بعيدا عن تقنياتها الرياضية . لكل قناة منعزلة معتبرة لها سعة ص خاصة بها ، سواء انقلت تلك القناة الارقام الثنائية ، الاحرف والاعداد ، او النقاط ، الفواصل والخطوط من طول معين ، كما ان لكل مستقر انتروبي معينة ت . اذا كانت ت اقل أو تساوي ص فاننا نستطيع بث الرسائل التي يولدها المصدر عبر القناة . أما اذا كانت ت اكبر من ص ، فعلينا الا نبث الرسائل المولدة من المصدر عبر القناة ، لان جهودنا لتحقيق ذلك ، ببساطة ، لن تفلح .

اوضحنا فيما تقدم كيفية برهان القسم الاول من هذه النظرية ، بينما لم نتطرق الى استحالة ترميز مصدر ذي انتروبي ت بعدد من الارقام الثنائية لكل رمز أقل من ت ، الا ان ذلك يمكن برهانه ببساطة .

نشعر في هذه المرحلة اننا احطنا وبثقة بحقيقة هامة مفادها ان انتروبي المصدر المرسل مقاسة بالبيت تطلعنا على عدد الارقام الثنائية

اللازمة لكل حرف او كلمة او في كل ثانية من اجل بث الرسائل التي يولد المصدر (تقابل هذه الارقام الثنائية نبضــات الفصل والوصـــل ، واصطلاحات نعم ولا) يرجع هذا التمييز الى بحث شانون الاساسي . واقع الامر ان مصطلح بيت وهو في اللغة الانكليزية Bit منحوت باختصار من كلمتين Binary اي ثنائي و digit اي رقم .

تختلف الانتروبي ، على كل حال ، مقدرة بالبيت عن عدد الارقام الثنائية على الصعيد العملي . نعرض على سبيل المثال مصدر رسائل يولد بشكل عشوائي الرمز ١ وفق احتمال مساو لـ ½ والرمز . باحتمال مقابل يساوي ½ ، وان ذلك المصدر يولد الرموز المشار اليها بسرعة ١٠ رموز في كل ثانية . صحيح ان هذا المصدر يعطي الارقام الثنائية بمقدار ١٠ ارقام في كل ثانية ، الا ان السرعة المعلوماتية له والانتروبي تساوي فقط ٨١١ر٠ بيت لكل رقم ثنائي وهي تساوي ١١ر٨ بيت في كل ثانية . نستطيع ترميز سلسلة الارقام الثنائية المنتجة من قبل هذا المصـــدر باستخدام عدد وسطي من الارقام الثنائية مســاوي لـ ١١ر٨ في كل ثانية .

نفترض ، شكل مماثل قنـــاة اتصال قادرة على نقل ١٠٠٠٠٠ نبضة قطع ووصل في كل ثانية . ان سعة هذه القناة هي ١٠٠٠٠٠ بيت في كل ثانية حسب ما تقدم ، الا ان استخدامها لنقل نموذج متكرر من النبضات سيعني بالتالي عدم نقلها اي معلومات ، بشكل ادق تكون سرعة نقلها للمعلومات في هذه الحالة مساوية لصفر بيت في الثانية على الرغم من سعتها التي اشرنا اليها .

انطوى ادراجنا لمفهوم البيـــت هنا على المقايسة الثنائية لكميـــة المعلومات ، كقياس الانتروبي او سرعة المعلوماتية لمصدر رسائل وفق واحدة البيت لكل رمز او البيت في الثانية ، او كقياس لامكانيات قناة ما في مجال نقل المعلومات مقاسة بالبيت لكل رمز او البيت في الثانية . نستطيع وصف البيت على انها خيار اولي ثنائي او قرار يبين امكانيتين متساويتي الاحتمال . تمثل البيت عند مصدر الرسائل كم محدد من

الخيار فيما يتعلق بالرسالة التي سيتم اصدارها . وكمثال على ذلك نذكر ان كتابة النصوص اللغوية تضعنا امام خيار وسطي قدره ١ بيت لكل حرف . تتكشف واحدة البيت عند المستقبل عن درجة من الريبة ، ففي استعراض النصوص اللغوية هناك تقريبا ١ بيت من الريبة فيما سيكون عليه الحرف التالي .

عندما نبث رسائل منتجة من مصدر معين بواسطة نبضات القطع والوصل ، فاننا نعلم بدرجة كافية كمية الارقام الثنائية المنطلقة في كل ثانية حتى عندما لا نعلم أي شيء عن الانتروبي المصدر ، وينطبق هذا في معظم الحالات . اذا عرفنا ان انتروبي المصدر اقل من الارقام الثنائية التي يتم توظيفها في كل ثانية ، لعلمنا اذ ذاك بشكل مسبق امكان قيامنا بالعمل باستخدام عدد اقل من الارقام الثنائية في كل ثانية . لقد تعلمنا كيفية استخدام الارقام الثنائية لتقرير خيار واحد من عدة امكانات مختلفة ، اما باستخدام شجرة كتلك التي وضحها الشكل ٤ ــ ٤ ، او بواسطة طريقة هوفمان التي عرضها الشكل ٥ ــ ٣ . انه امر شائع في مثل هذه الحالات ان نتحدث عن سرعة البث مقدرة بالبيت في الثانية ، الا ان ذلك قد يشوش من ليس لديهم خبرة كافية ويعثر خطاهم .

كل ما اطلبه من القارىء العزيز ان يتذكر انني استخدمت البيت في معرض واحد فقط هو قياس المعلومات ، وانني دعوت الـ . او الـ ١ رقم ثنائي . اذا ارسلنا ١٠٠٠٠ رقم ثنائي اخترت بشكل حر في كل ثانية نستطيع اذا ذاك تنفيذ بث معلوماتي بمعدل ١٠٠٠٠ بيت في كل ثانية . اذا وجدنا من المناسب استخدام البيت في معرض تناولنا للرقم الثنائي فعلينا في هذه الحالة ان نكون متفهمين وبدقة لما نحن فاعلون .

نتوقف الآن للحظة بقصد العودة الى طريقة هوفمان التي عرضناها للتو . عندما نستخدم هذه الطريقة لترميز رسالة ما ونحصل على سلسلة غير متقطعة من الرموز كيف لنا ان نقرر فيما اذا كان علينا استخدام رمز معين مثل ١ وارد في سلسلة الرموز كممثل لكلمة الـ او كممثل لكلمة اخـرى .

اذا عدنا الى مثالنا في حالة طريقة هوفمان نلاحظ ان اي من الرموز الواردة لا يشكل الجزء الاول من رمز آخر . تسمى هذه الظاهرة بخاصة البدء ولها نتائج هامة ومدهشة سهلة الايضاح . نفرض مثلا اننا نرمز الرسالة . الرجل يبيع البيت الى الرجل الحصان يركض الى الرجل . تكون الرسالة المرمزة على الشكل التالي :

ال	رجل	يبيع	ال	بيت	ال	رجل
١	١٠٠	٠٠٠٠٠٠	١	١١٠٠٠		

الى	ال	رجل	ال	حصان
١١	١	١٠٠	١	١٠٠٠٠
الى	ال	رجل	ال	حصان

يركض	الى	ال	رجل
٠١٠	١١٠	١	١٠٠
يركض	الى	الـ	رجل

كتبنا هنا كلمات الرسالة فوق الرموز . اما الكلمات تحت الرموز فقصدنا بها إمكانية تحليل خاطىء لمحتوى الرسالة لدى المستقبل ، إذ قد يحدث اننا لن نتلق الرسالة إلا بدءاً من رمـز البيت ١١،٠٠٠ وأن الصفر الأخير منه لم يرسل لسبب ما ، لذا نحلل الكلمة الأولى وفق رموزنا على انها (الرجل) ، إلا أننا نلاحظ بعد ذلك أن الرسالة سرعان

ما تستعيد صحتها . ليس من الضروري أن نعرف المقطع حيث بدأت الرسالة حتى يتسنى لنا تحليلها بشكل صحيح ، إلاّ اذا كانت الرموز من نفس الطول .

اذا نظرنا الى الوراء قليلاً نجد اننا حققنا اهداف هذا الفصل . فقد توصلنا الى قياس المعلومات التي يولدها مصدر مستقر وهو قياس منسوب لكل رمز أو لكل ثانية من الزمن، واوضحنا كيف أن هذا القياس يكافيء القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية اللازمة لبث الرسائل التي تنبثق عن المصدر المذكور . كما رأينا أن تحقيق الارسال باستخدام ما يزيد عن الانتروبي بجزء طفيف من البيت ، يوجب أن نرمز الرسائل التي يولدها المصدر في تراكيب طويلة ، ولا تقتصر على اعتبارها سلسلة من الرموز التفصيلية .

رب سائل يقول : ما هو الطول المفروض والممكن للتراكيب ، نعود هنا الى اعتبار آخر . هناك سببان رئيسيان للترميز وفق التراكيب الطويلة . أما السبب الأول فهو أن نجعل القيمة الوسطية المستخدمة في طريقة هوفمان لعد الأرقام الثنائية المقابلة لكل رمز أكبر بقليل من الانتروبي محسوبة لكل رمز ، في حين يتعلق السبب الثاني بتأثير الرموز السابقة على احتمال ظهور رمز معين سيما عندما نواجه موضوع الترميز الفعال للنصوص اللغوية . رأينا أن ذلك ممكن من حيث المبدأ باستعمال التراكيب الطويلة والعلاقة الخاصة بحساب الانتروبي لكل رمز .

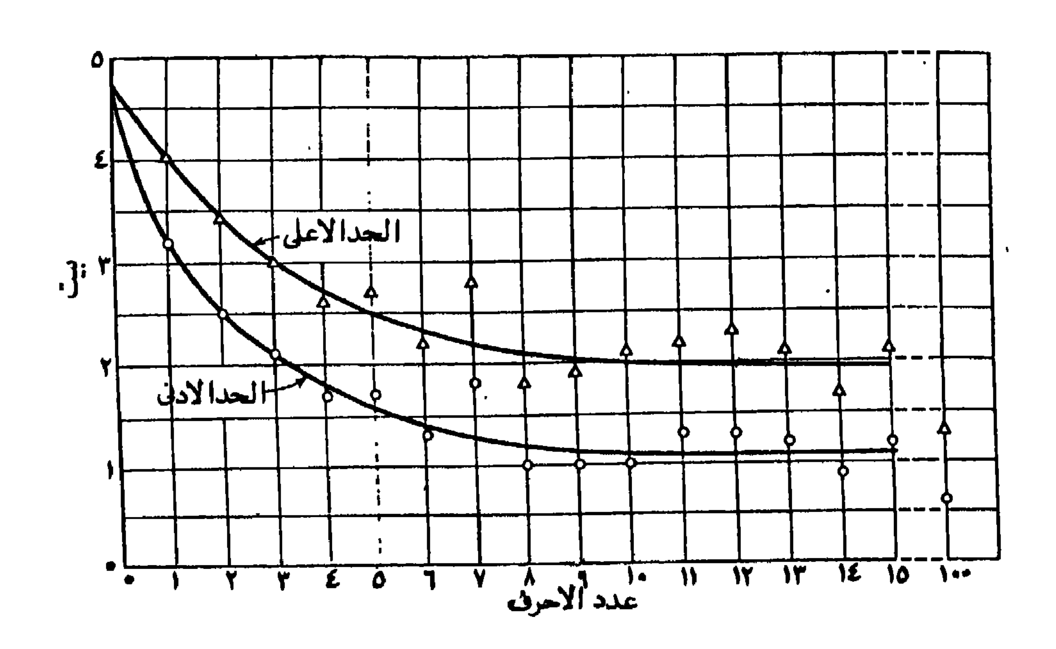
نطرح ، إذن ، السؤال مرة اخرى ، ولكن في صيغة جديدة :

كم عدد الرموز ن التي يجب ان يحتويها كل تركيب بحيث يتحقق الشرطان :

١ ــ ترميز هوفمان له كفاءة عالية . ٢ ــ اذا اعتبرنا الانتروبي لكل تركيب باهمال علاقات التركيب مع ما يقع خارجه ، فان هذه الانتروبي يجب أن تكون قريبة جداً من حاصل ضرب العدد ن في الانتروبي لكل رمز . اذا كنا بصدد النصوص اللغوية ، فان الشرط الثاني هو الأكثر اهميــة .

حسب شانون الانتروبي لكل حرف في حالة النصوص الانكليزية بقياس قابلية شخص ما لتخمين الحرف التالي من النص بعد رجوعه الى الحرف الأول والثاني والثالث ..... الخ مما سبق من الأحرف. استندت تلك النصوص بالطبع الى الأبجدية الانكليزية المؤلفة من ٢٦ حرف مع فراغ اضافي .

يوضح الشكل ٥ ــ ٤ الحدين الادنى والأعلى الانتروبي النصوص الانكليزية بدلالة الأحرف التي اطلع عليها الشخص المعني قبل إصدار حزره المنتظر .



الشكل ٥ ــ ٤

ينخفض المنحني بشكل ملحوظ بين العددين ١٫٥ — ١٠٠٠ اللذين يشيران لعدد الأحرف ، بينما يهبط ببطء بين العددين ١٠ — ١٥٠ يؤكد ذلك أن الترميز الفعال لنصوص اللغة الانكليزية يقضي استخدام تراكيب لا تقل أطوالها عن ١٠٠٠ حرف .

تعطينا قراءة الشكل ٥ — ٤ قيمتين هما ٦ر٠ ، ٣ر١ بيت لكل حرف ، تنحصر بينهما انتروبي النصوص الانكليزية . دعونا نفرض القيمة ١ لتلك الانتروبي ، فنحتاج اذ ذاك الى ١٠٠ عدد ثنائي لترميز تراكيب مؤلف من ١٠٠ حرف . يعني هذا أن هناك $٢^{١٠٠}$ سلسلة ممكنة من التراكيب الانكليزية يحتوي كل منها على ١٠٠ حرف . ولاعطاء فكرة عن حجم العدد $٢^{١٠٠}$ نقول انه يساوي تقريبا واحد متبوع بـ ٣٠ صفر ، يا له من عدد هائل .

يقودنا البحث من احتمال ورود كل التراكيب ذات المعنى المؤلف كل منها من ١٠٠ حرف من الأبجدية الانكليزية ، الى حساب التواترات النسبية لكل تراكيب ، إلاّ أننا سرعان ما سندرك استحالة هذه العملية عندما نعلم أن هناك تقريبا من هذه التراكيب $١٠^{٣٠}$ تراكيب مختلف .

إلاّ أن ذلك مستحيل أصلاً من حيث المبدأ . فمعظم التراكيب المعدودة من أصل $١٠^{٣٠}$ تراكيب لم تكتب بعد ، علما أن العدد $١٠^{٣٠}$ لا يشمل فعلاً كل التراكيب ذات المعنى . تؤكد بالتالي استحالة الحديث من التواترات النسبية والاحتمالات الخاصة بهذه التراكيب وفق ورودها في النصوص الانكليزية .

تواجهنا هنا معضلتان : ما هي دقة توصيف النصوص اللغوية باعتبارها ناتج مصدر مستقر ، وما هي الخصائص الاحصائية الاساسية لذلك المصدر . قد نميل الى الاعتقاد بوجود احتمالات مناسبة لدى الانسان حتى إذا لم يكن تقييمها ممكناً بتفحص النصوص المكتوبة . أو

لربما أن تلك الاحتمالات موجودة فعلاً وأن معرفتها ممكنة ليس من خلال الطريقة البدائية لحساب احتمالات ورود سلاسل الأحرف ، بل باتباع أسلوب آخر أكثر نجاعة . لقد استعرضنا علاقات مختلفة لحساب الانتروبي في حالة المصدر المستقر وحالة الآلة المتناهية الحالات ، كما عرجنا في نهاية الفصل الثالث على فكرة اعتبار الانسان في حالة معينة وانتاجه تبعاً لذلك لرمز أو كلمة ، ورأينا أن مثل هذه الفكرة جديرة بالاهتمام فعلاً .

يعارض بعض اللغويين بحجة أن القواعد اللغوية لا تتفق وخرج الآلة المتناهية الحالات . نعترف في هذا الصدد أنه لفهم بنية النصوص اللغوية والانتروبي الخاصة بها أن نتعمق أكثر في دراسة النصوص اللغوية مما فعلناه حتى الآن .

ان تطبيق نظرية رياضية بشكل مباشر ميكانيكي على حقل الافتراضات المجردة التي انبثقت عنها تلك النظرية ، هو عمل على جانب كبير من الأمان وفي غاية المهارة . بينما علينا أن نلتزم أكثر بالحكمة والتعقل عند تطبيق نظرية رياضية على أمور واقعية ؛ مهما كانت تلك النظرية جيدة ومناسبة . اذا رغبنا فعلاً بربط النصوص اللغوية بنظرية الاتصالات وبإنجاح هذا الربط أكثر ما يمكن ، فعلينا أن نسعى الى اشكال بسيطة وواقعية للقوانين الحاكمة لتلك النصوص . تنطوي تلك القوانين بالطبع على قواعد اللغة ، وسنستعرض تلك القواعد في الفصل القادم .

وفي كل الأحوال ، فإننا نعلم معلومات إحصائية جيدة عن النصوص اللغوية ، كتواتر الكلمات والأحرف ، كما تؤهلنا نظريات الترميز للاستفادة من كل تلك المعلومات .

اذا رمزنا النصوص الانكليزية حرفاً بحرف ، غاضين النظر عن التواترات النسبية للأحرف يلزمنا عندها ٤,٧٦ رقم ثنائي لكل حرف ، ونعتبر الفراغ في هذه الحالة حرف ، بينما اذا كررنا نفس العملية

آخذين بعين الاعتبار التواترات النسبية للأحرف ، يصبح الرقم المذكور ٤ر٠٣ رقم ثنائي لكل حرف . اما إذا رمزناها كلمة بكلمة وفق التواترات النسبية للكلمات نحتاج لـ ١ر٦٦ رقم ثنائي لكل حرف ولقد استطاع شانون باستخدام طرق مبدعة تحديداً لانتروبي للنصوص الانكليزية بين العددين ٠ر٦ ــ ١ر٣ بيت لكل حرف ، ونأمل بذلك أن نلتقي ترميزاً أكثر فعـالية .

إلا أن اندفاعنا بشكل ميكانيكي في اتباع طريقة معينة حتى نهايتها لحساب الانتروبي ، قد يضعنا في مواجهة صعوبات كبيرة ويضيع جوهر بحثنا . وإذا حدث ذلك فيعود بشكل جزئي الى الفروق بين الانسان كمصدر للنصوص اللغوية وبين نموذج المصدر المستقر الذي درسناه ، وأما السبب الجزئي الآخر فهو طريقة التناول غير الملائمة . إن نموذج الانسان كمصدر مستقر للنصوص هو نموذج جيد ومفيد إلا أنه ليس كاملاً بالطبع ، لذا نقيم عالياً هذا النموذج .

لقد كان هذا الفصل طويلاً وغنياً بالتفاصيل ، ويحتاج قبل إنهائه الى عرض موجز . لن نستطيع بالطبع تلخيص كل مـا قدمناه ، فقد احتاج ذلك التقديم الى صفحات كثـيرة . لذا سنكتفي بالتركيز على النقاط الهامة وحسب .

تقدر الانتروبي الخاصة بكل اشارة في نظرية الاتصالات بالبيت لكل رمز أو لكل ثانية وهي تعطي القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية لكل رمز أو لكل ثانية ، الضرورية لترميز رسالة ينتجها مصدر ما .

نتصور مصدر الرسائل على انه يختار بشكل عشوائي ، أي بشكل غـير قابل للتنبؤ ، رسالة من بين رسـائل متعددة ممكنة . لذا نربط الانتروبي في حالة المصدر بمقدار الخيار الذي يمارسه المصدر في انتقاء رسالة معينة ستبث فعلا .

اما عن المستقبل ، فنفرض أنه قبل استلامه للرسالة سيكون غير اكيد فيما يتعلق بالرسالة التي سيولدها المصدر ويرسلها اليه . بناء على ذلك، ننظر الى انتروبي مصدر الرسائل كمعيار لريبة المستقبل حول الرسالة التي ستصل ، وهي ريبة ستحل عند استلام الرسالة .

اذا تم اختيار الرسالة من بين عدد من الرسائل متساوية الاحتمال كان الانتروبي لع ن ، حيث ن هو عدد الرسائل الممكنة . ويبدو هذا التعريف طبيعياً للغاية ، لأنه اذا توفر لدينا عدد من الأرقام الثنائية يساوي لع ن ، لتمكنا من استخدامها في كتابة مجموعة من الأعداد الثنائية تضم :

$$٢^{لع\ ن} = ن \quad \text{عدداً ثنائياً .}$$

وسنربط الرسالة المولدة بأحد هذه الاعداد . اما اذا لم تكن الرموز متكافئة الاحتمال ، وهي الحالة العامة ، فتعطى الانتروبي وفق أول علاقة عرضناها في هذا الفصل . اذا اعتبرنا تركيباً طويلا من الرموز ، لا يعتمد محتواه الا قليلا على ما سبقه من الرموز ، ونظرنا اليه كرمز جديد ، فيمكننا تعديل العلاقة المذكورة لنحصل على انتروبي المصدر لكل رمز ، حيث يعتمد اختيار رمز معين على الرموز التي سبق وجرى اختيارها . تفسح هذه الافكار المجال لنا لاستنتاجات علاقات أخرى خاصة بالانتروبي كانت في عداد مواد هذا الفصل .

اذا استخدمنا طريقة هوفمان في الترميز ، وهي طريقة ذات كفاءة عالية ، نستطيع ان نبرهن أن انتروبي المصدر المستقر مقاسة بالبيت تساوي القيمة الوسطية لعدد الارقام الثنائية اللازمة للترميز .

قد لا تمرر قناة اتصال نموذجية الأرقام الثنائية ، ويمكن أن تحمل الاحرف او الرموز الاخرى . نتصور اننا وصلنا عدة مصادر الى مثل هذه القناة ، وبحثنا بعد ذلك بوسائل رياضية عن المصدر الذي سيجعل

من انتروبي الرسالة العابرة للقناة اكبر ما يمكن . نستطيع تعريف سعة قناة الاتصال النموذجية استناداً لما تقدم ، ونعني بالقناة النموذجية القناة الخالية من الأخطاء ، تعطى سعة هذه القناة بأكبر انتروبي لرسالة يمكن أن تمررها القناة . يمكن البرهنة على انه اذا كانت انتروبي المصدر اقل من سعة القناة فان القناة في هذه الحالة تمرر رسائل المصدر المرمزة . تعرف هذه بنظرية شانون الأساسية للأقنية الخالية من الضجيج .

تمكننا العلاقات الواردة في هذا الفصل من حساب انتروبي المصدر بواسطة التحليل الاحصائي للرسائل المنبثقة عنه ، الا أن ذلك قد يستدعي حسابات طويلة حتى في حالة المصادر المستقرة . اما في حالة المصادر الفعليـة كالنصوص اللغوية ، فان الوصفات الأولية لحساب الانتروبي تبدو لا معنى لها .

يتحقق الحساب التقريبي لقيمة الانتروبي بإهمال اثر الرموز السابقة على احتمال اختيار المصدر للرمز التالي ، وتكون القيمة التقريبية الناتجة عادة اكبر وتستدعي الترميز باستخدام عدد من الأرقام الثنائية اكثر مما يلزم . وهكذا اذا رمزنا النصوص الانكليزية حرفاً بحرف بصرف النظر عن الاحتمالات النسبية للأحرف ، نحتاج الى ٤٫٧٦ رقم ثنائي لكل حرف ، أما اذا رمزناها كلمة بكلمة ، آخذين بعين الاعتبار الاحتمالات النسبية للكلمات لاحتجنا الى ١٫٦٦ رقم ثنائي لكل حرف .

واذا رغبنا برفع مستوى ادائنا لاعتبرنا الميزات الأخرى للغة كتأثير القواعد اللغوية مثلا على احتمال توليد المصدر لكلمة معينة .

على الرغم من اننا لا ندري طريقـة معينة يمكن بواسطتها ترميز النصوص الانكليزية بأكثر ما يمكن من كفاءة ، فقد اجرى شانون تجربة مبدعة اثبت بموجبها ان انتروبي النصوص الانكليزية تتراوح بين ٠٫٦ الى ١٫٣ بيت لكل حرف . انطوت هذه التجربة على تحزير شخص معين عن الحرف التالي في نص مكون من عدد كبير من الأحرف .

الفصل السادس

اللغة والمعنى

يتلخص الانجازان الكبيران لنظرية المعلومات بتعريف وحساب استطاعة القناة وعلى الأخص تحديد عدد الأرقام الثنائية اللازمة لارسال المعلومات من مصدر معين ، وكذلك أن سرعة المعلومات عبر قناة مشوبة بالضجيج يمكن أن تأخذ كل القيم المتزايدة طالما أن الارسال يحدث دون أخطاء رغم وجود الضجيج ، تقدر هذه السرعة بالطبع بالبيت لكل حرف أو البيت لكل ثانية يجب أن تثبت كل النتائج وفي كل الاحوال للمصادر والأقنية المتقطعة وكذلك المستمرة .

لقد استنفذنا مرحلة اعداد طويلة في الفصول الاربعة الأولى أصبح بمقدورنا بعدها وفي الفصل الخامس طرح مشكلة عدد الأرقام الثنائية اللازمة لارسال المعلومات المولدة عن مصدر مستقر فعلي . لو كان هذا الكتاب مجرد كتاب مدرسي عن نظرية المعلومات ، لانتقلنا اذن الى المرحلة المنطقيـة التالية ، وهي القناة المشوبة بالضجيج ومن ثم القناة المستمرة والمستقرة .

الا أن أفكارنا سرعان ما ستعود عند نهاية هذه العملية المنطقيـة المتقدمة الى اعتبار مصادر الرسائل في العالم الواقعي ، والتي يمكن وصفها بتقريب ما على انها مستقرة ومن ثم حساب الانتروبي الخاصة بها . والبحث عن اكثر الطرق كفاءة في ترميز الرسائل الصادرة عنها .

ونحن بدورنا سنتوقف هنـا عن الاسترسال في الشروح الرياضية لنظرية الاتصالات ونتناول أكثر أدوات الاتصال تشويقاً وجاذبية ، نعني اللغة ، ولكن من منظور نظرية الاتصالات . اذ يحق لنا وقد علونا قمة من قمم المعرفة المتواضعة ان ننظر منها الى جانب هام من حياتنا ، وأن نتبين فيما اذا كانت مشاكل اللغـة والمعنى ستبدو مختلفة في اطـار ما تعلمناه .

نطلب من القارىء العزيز ان يكون حذراً في هذا السياق . لقد كان تركيزنا حتى الآن على ما نعرفه ، وما نعرفه هو النواة الصلبة للعلم . يجد العلماء صعوبة بالغة في مشاركة الانسان العادي بما يعرفونه . اعتقد بناء على ذلك ان الاحاطة بالمعارف العلمية تقتضي جهوداً جبارة كتلك التي بذلها القارىء عبر الفصول القليلة السابقة .

على ان هناك جانباً ابسط واكثر امتاعاً للعلم . انه ذاك الضرب من الجهل المعلن . يختلف جهل العالم عن جهل الانسان العادي ، ذلك لأن الخلفية العلمية لدى العالم والمكونة من النظريات والحقائق المثبتة تبعد عن ميدان تنبوءاته كل الافتراضات والتصورات التي لا معنى لها . أما الشكل الأعلى والحدي من جهل العالم وهو الذي نطلق عليه اسم الجهل المعلن فيشمل أصل الكون والأصول العميقة للمعرفة وعلاقة مستوى المعارف الحالية بالارادة الحرة والأخلاقيات واسياسة . سنحوم في هذا الفصل الخاص حول موضوع اللغة بشكل يمكن ان نطلق عليه من وجهة النظر العلمية انه الجهل المعلن بموضوع اللغة .

نعود فنؤكد ان ما سنعرضه في هذا الفصل ليس اكثر من بنود نابعة من الجهل المعلن ، وهذا التأكيد ضروري للغاية اذ قلما يجد الانسان غير المتخصص وسيلة ناجعة يستطيع بواسطتها التفريق بين الحقيقة العلمية والجهل العلمي . ان الجهل أسهل تمثلا من العلم ذلك لأن الجهل يمكن التعبير عنه بعبارات عريضة شديدة العمومية وجمل ذات كفاءة منخفضة بالمقارنة مع الحقيقة ، ولأن الجهل اضافة الى ذلك معنى بالمشاكل غير المحلولة فهو أكثر رومانسية . ينتشر الجهل اكثر ويجد له صدى أوسع بالمقارنة مع الحقائق العلمية .

واذا كان الجهل خطراً بهذا الشكل على الانسان العادي ، فله موقع مهم لدى العالم ، فمنه يكون العالم الرؤى المحيطة بالعوالم البعيدة والأبعاد غير المنظورة ، وهذا ينزع الاحساس الآني بالراحة والرضى الذاتي لديه ويستحثه لإسراع خطاه على طريق الاكتشاف بدلا من مجرد السير البطيء على ذلك الطريق . عندما يحس العالم بجهله ، فسرعان ما سيخطط لما يتوجب عليه ان يفعله ، في حين ان الانسان العادي لن يستطيع ذلك وسيتيه في اجواء الجهل الضبابية دون أن يجد اي فرصة لوضع قدمه على ارض المعرفة الأمينة .

نعود الآن الى حيث واجهنا مشكلة اللغة لننطلق من هناك ، بعد أن وضعنا الخطوط العامة لمحاذير تقدمنا في أرض مجهولة .

سنقتصر فيما يلي من بحثنا على قواعد اللغة الانكليزية . نعرف جميعاً ان اللغة اليومية الدارجة لا تخضع لقواعد اللغة ، مثلما مؤلفات غير ترود شتاين . ويظهر الخروج عن قواعد اللغة خاصة في المحاضرات العلمية والتكنيكية . يذهب المغالون في الالتزام بقواعد اللغة حد رفض كثير من الأشعار الجيدة ، بحجة عدم موائمتها لتلك القواعد .

لذا فإن استعراض قواعد اللغة لا يعني تغطية كل الجمل المنطوقة او المكتوبة وجل ما يفعله هو انه يرسي مساراً إجمالياً يمكن أن نتبعه باهتمام وبشكل منظم .

عرفنا فيما سبق ان كتابة اي نص لغوي يجب أن يخضع الى عدد من القيود . يمكن ان نجد تفاصيل كل تلك القيود في كتاب متكامل عن قواعد اللغة . تفند تلك القواعد الأحكام اللازمة لإنشاء اي سلسلة من الكلمات التي سيتم قبولها في وقت معين ووفق معيار معين على انها منسجمة مع القواعد .

ان قضية قبول الإنشاء اللغوي من وجهة نظر القواعد هي قضية شائكة وغير واضحة المعالم ، فكثيراً ما تقبل مخالفات للقواعد وفق المؤلف

ووفق منزلة الكتاب وغالباً ما تكون نفس المخالفات غير مقبولة اذا استخدمت في مجالات اخرى . وبصورة عامة يتغير ما هو مقبول بالنسبة للقواعد بشكل مستمر . قصدنا بذلك مجرد الملاحظة وننتقل الآن الى مواضيع اخرى .

تتضمن القواعد مجموعة من الاحكام المسبقة التي تسمح بالإنشاء اللغوي الأصولي ، اي الإنشاء الخاضع لتلك الاحكام وحسب . والى جانب ذلك فلهذه الاحكام مهمة اخرى ، اذ بواسطتها نتمكن من تمييز كل الجمل والمقاطع المتفقة مع تلك الاحكام والواردة في نص معين ، من الجمل والمقاطع الاخرى غير المتفقة معها .

اذا استطعنا الاحاطة بتلك الاحكام كان بإمكاننا اجراء تقييم جديد لانتروبي النصوص الانكليزية ، اذ نميز في هذه الحالة الأجزاء التي هي عبارة عن تطبيق ميكانيكي ومباشر للقواعد والأجزاء الاخرى التي تنطوي على خيار او ريبة وتساهم بذلك في الانتروبي . ونستطيع ، اكثر من ذلك ، بث الرسائل اللغوية بشكل فعال بأن نحمل الرسالة المعلومات المتعلقة بالخيارات الممارسة اثناء الإنشاء ، ونستخدم عند المستقبل آلة قواعد خاصة تعيد انشاء الجمل وفق اصول القواعد استناداً للخيارات المدرجة في الرسالة المستقبلة .

ليست احكام القواعد هي كل شيء في اللغة ، فقد تبدو جملة ما في منتهى الغرابة رغم خضوعها الكامل لاحكام القواعد . يمكن لآلة انشاء لغوية لقمت كل القواعد بكل تفاصيلها ، ان تركب جملة مثل : اكل الخبزُ الخبزَ . اذ أن كل ما تفعله الآلة هو جملة من الخيارات بين الكلمات آخذة بعين الاعتبار القواعد اللغوية ، اما الانسان فيبني خياراته بشكل مخالف ، اذ ان الكاتب يتبع احكام القواعد ، الا انه يجري خيارات اخرى ايضاً . ان فهم القواعد لن يكشف لنا كل اسرار اللغة ، الا انه سيدفعنا خطوة الى الامام على الطريق الصحيح .

ما هو نوع الاحكام التي ستتمخض عن جمل سليمة من وجهة نظر القواعد ، وعن كل الجمل بشكل عام ، حتى لو كانت الخيارات عشوائية . رأينا في الفصل الثاني كيفية انتاج نصوص شبيهة بالنصوص الانكليزية وذلك باختيار كلمة عشوائياً وفق احتمال ورودها بعد سلسلة معينة ومحددة الطول من الكلمات ، وكان مثالنا حين ذاك التقريب الثاني الذي ترد وفقه الكلمة على أساس الكلمة السابقة لها .

يمكن لأي منا انشاء تقريبات اعلى باستخدام المعارف اللغوية المختزنة في دماغه ، وهكذا يستطيع مثلا تحقيق التقريب الرابع باعتباره ثلاثة كلمات متتالية وعرضها على شخص آخر لاضافة كلمة رابعة والحصول على جملة ، وبتكرار هذه العملية والانتقال من شخص لشخص قد نحصل على مقطع مثل : حدث ذلك في منظر ضبابي للأشجار المترنحة بهدوء على الجسر .

يعد هذا المقطع معقولا بكيفية ما لأن اختيار الكلمات لم يتم بشكل عشوائي وانما اجرته كائنات عاقلة . والشيء المدهش في مثل هذا المقطع ملائمته لأحكام القواعد ومنطقيته المقبولة على الرغم من انه انشيء بشكل مطرد بإعطاء الكلمات الثلاثة الأخيرة من الجزء المتكامل منه عند مرحلة معينة والطلب الى شخص ما اضافة الكلمة الرابعة . وعلى الرغم من ذلك فقد نحصل أحياناً على مقاطع غير معتدلة البتة اذا اتبعنا نفس الطريقة ، مثلا قد نحصل على المقطع : رأيته آخر مرة عندما عاش ، الذي يبدو أيضا غير موائم لأحكام القواعد بشكل كامل .

اذا كان شانون على حق واذا توفر في النصوص الإنكليزية خيار يكافيء ١ بيت لكل رمز ، فإن الاختيار من بين ٤ كلمات يعني حوالي ٢٢ خيار ثنائي ٢ او خيار بين ١٠ ملايين تركيب في كل تركيب ٤ كلمات . يمكن من حيث المبدأ ان يقوم كومبيوتر بإضافة الكلمات استنادا لمثل هذا الجدول من التراكيب ، إلاّ أن النواتج لن تكون ملائمة لأحكام القواعد بشكل مؤكد ، اضف الى أن هذه الطريقة الطويلة جداً قد لا تتمخض عن كل

السلاسل الممكنة من الكلمات الخاضعة لأحكام القواعد ، فهناك بعض سلاسل الكلمات التي قد تشكل جزءاً من جملة سليمة وفق القواعد في بعض الاحوال ولا يمكنها تحقيق ذلك في أحوال اخرى . وهكذا إذا لم نضمنها فستأتي النتيجة ناقصة بعض الجمل السليمة وفق القواعد .

أما اذا اعتبرنا التراكيب المحتوية على أكثر من ٤ كلمات ٢ فسنفضل عندها القواعد على الكمال ، ويحدث العكس إذا خفضنا عدد الكلمات في كل تركيب عن ٤ ، إذ عندها ستكون المفاضلة للقواعد على حساب الكمال . اننا لن نستطيع جمع الاثنين .

تعاود الظهور ، في هذه المرحلة ، فكرة الآلة المتناهية الحالات . فلربما اننا نستطيع ربط آلة منتجة للجمل اللغوية ، تكون في حالة معينة عند كل نقطة من الجمل وهذا سيسمح لها بإجراء خيارات معينة وفق الحالات التي يمكن أن تنتقل اليها انطلاقا من الحالة المحددة ، ولربما أن مثل هذه الآلة سيمكنها التعامل مع أنواع معينة من الكلمات كالأسماء المفردة ، والصفات والأفعال وغيرها وبذات تستطيع إنتاج نصوص لغوية سليمة وفق القواعد وتفسح المجال لتضمين الكلمات فيها باكثر من ملائمتها لادراج سلاسل الكلمات .

يبدو تشبيه القواعد بآلةمتناهية الحالات مشجعاً بصورة خاصة ذلك لأن بعض وجهات النظر للإنسان ترى فيه آلة متناهية الحالات ، ببساطة لأنه يتكون من عدد محدد من الخلايا وبالتالي من عدد محدد من الذرات .

يرفض شومسكي ، وهو لغوي معاصر معتبر ، فكرة الآلة المتناهية الحالات كنموذج ممكن أو ملائم للقواعد اللغوية ، فهو يشير الى عدد من احكام انشاء سلاسل الرموز التي تضمينها في مثل هذا النموذج . من هذه الأحكام مثلا أن نختار على التتالي للأحرف الابجدية بشكل عشوائي حتى ظهور الحرف Z ثم نكرر بعد ذلك كل الاحرف المدرجة اعتباراً من آخر ورود للحرف Z ولكن بترتيب معاكس ، نتابع بعدها في

مجموعة جديدة من الأحرف وهكذا . ستنتج هذه العملية سلسلة من الأحرف مجسده لنظام مديد ، اضافة الى أنه لا يوجد حد لعدد الأحرف المحصورة بين ورودين متتالين للحرف Z . لا تستطيع آلة متناهية الحالات بامكانها تحقيق مثل هذه العملية .

يؤكد شومسكي أنه لا يوجد حد معين لطول الجملة السليمة وفق القواعد في اللغة الإنكليزية ، ويضيف ان جمل اللغة الإنكليزية مرتبة بشكل ينفي دور الآلة المتناهية الحالات كمنتج وحيد لكل نصوص اللغة الإنكليزية . ولكن هل نستطيع فعلا اعتبار جملة طولها كيلو مترات على انها سليمة وفق القواعد سيما واننا علم ان أحداً ما لم ولن ينتج مثل هذه الجملة ، وحتى لو وجدت فستكون غير مفهومة .

ان تقرير مثل هذا الأمر لا يمكن بدون معايير معينة لتقرير سلامة النص وفق القواعد . يشير شومسكي الى ما هو سليم وما هو غير سليم وفق القواعد واعتقد أن معياره يستند الى ضرب من السياقية الطبيعية ، فالجملة حسب شومسكي سليمة وفق القواعد فيما اذا قيلت بصوت عالٍ وتقطيع واضح واصدر عليها هذا الحكم شخص يتفوه بها أو يسمعها ان الأمور التي تقض مضجع الآخرين يبدو انها لا تزعج شومسكي ربما لأنه يتحدث لغة إنكليزية متماسكة وسليمة وفق القواعد .

هل يمكن تضمين قواعد اللغة في آلة متناهية الحالات أو لا يمكن ؟ يطرح شومسكي شاهداً مقنعاً على خطأ محاولة انشاء الجمل بجعل الخيار التالي للكلمة تابعاً للكلمات التي سبقت . يستعيض شومسكي عن ذلك برؤية أخرى لإنشاء الجمل هي التالية :

نبدأ بشكل أو آخر من عدة نماذج يمكن أن تأتي الجملة وفقها ، مثلا فعل يتبعه فاعل . يسمى شومسكي هذا الشكل الخاص : الجملة الاساسية ، ثم يستحضر أحكام القواعد لتوسيع كل جزء من أجزاء هذه الجملة ، وقد يصل ذلك به الى جمل مختلفة مثل : قذف الرجل الكرة ، أو : امسكت الفتاة القطة .

نلاحظ هنا ان فعل الخيار لم يمارس بشكل متسلسل عبر الجملة من بدايتها الى نهايتها ، بل تم اعتماد هيكل عام أو مخطط عام للجملة النهائية منذ البداية ، هذا المخطط هو الجملة الاساسية الذي نعبره الى أركانه المختلفة حيث يتم اختيار الكلمة المناسبة وفق كل ركن . ينحصر الخيار هنا عند كل عقدة من هذا الهيكل الاشبه بشجرة والذي تقع الجملة الاساسية منه عند الجذر .

لقد شرحت افكار شومسكي هنا بشكل غير كامل ووفق خطوطها العامة . فمثلا لدى اعتباره بعض اشكال الكلمات غير النظامية يحدد شومسكي أولا الكلمة الاساسية وشكلها الإعرابي العام ، ثم يطبق بعض الاحكام الإجبارية لبلوغ الشكل اللغوي الصحيح . وهكذا فإنشاء شومسكي المتفرع للجملة يعتمد بعض الأحكام الاختيارية التي تسمح بإجراء الخيار الحر الى جانب احكام اجبارية أخرى لا تسمح بأي خيار .

ان الفهم المفصل لشومسكي يقع خارج اهداف هذا الكتاب ويمكن الرجوع الى كتابه حول هذا الموضوع والمراجع الاخرى التي يشير اليها في كتابه .

ان على شومسكي ، طبعا ، ان يعالج مشكلة الجمل الغامضة ، مثل الجملة التالية : السيدة العالمة جعلت الروبوت أسرع خلال الوقت الذي اكلت به . لقد ابلغني مؤلف هذه الجملة ، وهو باحث في نظرية المعلومات ، ان هذه الجملة تحمل اكثر من ٤ معاني مختلفة في إطار اللغة العامية . ان هذه الجملة صعبة للغاية اذا اختيرت كنموذج للدراسة والتحليل .

قد نعتقد ان مرد الغموض هو المعاني المختلفة التي قد يقطعها كلمة أو اكثر ضمن نفس الإنشاء الإعرابي ، كقولنا مثلا : كان مجنونا ، بمعنى انه كان غاضبا او انه كان قد فقد عقله فعلا ، او قولنا : كان الطيار عالياً ، بمعنى انه حلق بطائرته على ارتفاع عالٍ ، أو كان عالياً في رده على استثاره ما . يعطي شومسكي مثالا بسيطا عن جملة غير واضحة تماماً ،

وسبب عدم الوضوح فيها هي احكام القواعــد ، والجملة هي : صيد الصيادين ، وقد تفسر بمعنى الصيد الذي يجلبه الصيادون ، أو بمعنى آخر هو ان يقوم البعض بصيد الصيادين ، اي جعل الصيادين من جملة فرائســه .

يؤكد شومسكي ان تطبيق احكام تحويل مختلفة على جمل اساسية مختلفة يمكن أن يؤدي الى نفس السلسلة من احكام القواعد . مثلا ، اذا اعتبرنا الجملتين : اللوحة تم رسمها بواسطة فنان حقيقي ، اللوحة تم رسمها بواسطة اسلوب جديد ، نلاحظ التقابل الإعرابي الدقيق بينهما ، إلاّ أن الاولى يمكن أن تنتج من تحويل الجملة التالية : لقد رسم اللوحــة فنان حقيقي ، أما الثانية فلا يمكن استنتاجها من جملة لها نفس الشكل . عندما تكون الكلمات النهائية والعناصر الإعرابية النهائية نفسها ، تكون غامضــة .

يواجه شومسكي المشكلة الكبيرة بأن الحدود الفاصلة بين السلامة وفق الإعراب وبين صحة المعنى هي حدود غير واضحة . مثلا : الجملة : الأخضر عديم اللون ، هي جملة سليمة وفق الإعراب ولا معنى لها . هل يمكن للقواعد أن تمنــع ربط بعض الصفات ببعض الأســماء أو بعض الاسماء ببعض الافعال وغير ذلك ؟ فوفق خيار ما تكون التراكيب سليمة وفق الإعراب وعديمة المعنى ، وفي خيار آخر تصبح غير صحيحة مــن وجهة نظر الإعراب إلاّ انها تؤدي معنى مفيداً .

وهكذا وضع شومسكي مخططاً لقواعد اللغة الإنكليزية يتضمن عند كل تفرع في عملية إنشاء الجملة خطى إجبارية واخرى اختيارية . لا يمكن تنفيذ مثل هــذه الخطى باستخدام الآلة المتناهية الحالات ، إلاّ انــه باستطاعة آلة اخرى فعل ذلك ، تعرف هذه الآلة بآلة تيورينغ وهي آلة منتهية الحالات اضيف اليها شريط تسجيل يمكن قراءة الرموز وكتابتها عليه ، وكذلك محيها . تشكل العلاقة بين قواعد شومسكي وهذه الآلــة مادة للدراسة في علم معاصر يعرف باسم الاتمتة .

يجدر بنا ان نلاحظ أننا إذا فرضنا حداً اعلى لطول الجملة بالغاً ما بلغ من الكبر ، كان نجعله مساوياً لالف او مليون كلمة ؛ فإن قواعد شومسكي ستبقى متناسبة مع الآلة المنتهية الحالات . ان فرض حـد أعلى لطول الجمل يبدو معقولا من الناحية العملية .

بعد ان يتم وضع مخطط عام او نموذج لقواعد كذلك الذي اقترحه شومسكي ، يبرز السؤال الهام : كيف يمكن تقدير الانتروبي وتحت اي ظروف ، تلك الانتروبي التي تقيس الخيار أو الريبة لمصدر رسائل يولد النصوص اللغويـة وفق احكام القواعد المعتمدة . يخص هذا السؤال الرياضي الحاذق العامل في مجال نظرية المعلومات .

لعله امر بالغ الاهمية ان نصيغ احكاما للقواعد معقولة وقابلة للعمل وفقها يمكن ان تكون تلك الاحكام ما اقترحه شومسكي تحت اسم : قواعد الانشاء باستخدام أجزاء الجمل ، او يمكن ان تكون متضمنة في اقتراحات مناسبة اخرى . يحتمل أن تكون تلك القواعد غير كاملة اذا هي فشلت بانتاج او تحليل التراكيب الواردة والمقبولة وفق القواعد اللغوية المعروفة ومما هو اكثر اهمية ان عمل هذه الاحكام يجب ان يتناسب مع الانشاء اللغوي الذي ينجزه كائن بشري ، وان يكون بسيطا لدرجة يمكن معها للكومبيوتر ان يقوم بتوليد وتحليل النصوص . اعتقد ان استخدام الكومبيوتر ضروري في تناول مشاكل النصوص اللغوية سواء من حيث انشائها او مواصفاتها الاحصائية .

يتناقض الدارسون في مواقفهم من انجازات شومسكي ، فبعضهم يرى فيها الجانب الأهم من قواعد اللغة الانكليزية بينما يشعر الآخرون ان طريقته في توليد الجمل يجب ان تعدل او ربما تحدد فيما اذا تـم التخطيط لاستخدامها في التوليد الفعلي للجمل المنتجة من قبل بني البشر يغمر الانسان شعور قوي ، لدى استماعه الى متحدث آخر او قيامه بالحديث هو نفسه ، بان الجمل تنبثق بشكل متماسك من البداية وحتى النهاية ، واكثر من ذلك فان لدى كل منا الانطباع بأن كائناً بشرياً من كان

لا ينتج جمله بتطبيق آلية جاهزة في دماغه لدى تفوهه او كتابته كل كلمة ، وعوضا عن ذلك يتعامل مع تلك الآلية بشكل عفوي وعبر سياق انتاجه للنصوص اللغوية .

لا أعتقد ان الدراسات المنصبة على اللغة والقواعد والاحصائيات المتعلقة بهما ستعطينا في المستقبل القريب معلومات جديدة عن طبيعة اللغة والانسان . واذا رغبت بقول ما هو اكثر خصوصية من ذلك ، فعلي تجاوز المعارف الحالية ، سواء اكانت معارفي او معارف الآخرين .

لا يقتصر عمل القواعد على بسط الاحكام الناظمة لعملية ضم الكلمات الى بعضها بهدف تكوين جمل مفيدة ، بل يتعدي ذلك الى تصنيف الكلمات . في زمر مختلفة وفقا للاماكن التي يمكن ان تظهر . عندها في النصوص المنشأة على اساس تلك القواعد يعد اللغويون مثل هـذا التصنيف استنادا الى القواعد الصرفة ودون ستخدام مفهوم لمعنى . وهكذا فكل ما نتوقعه من القواعد بناء جمل صحيحة من حيث الشكل ، وهذا يشمل الجملة التالية مثلا : نزل المطر على الارض باستخدام المصعد ان تضيف الكلمات وفق القواعد الى اصناف مختلفة مثل الاسماء ، الصفات ، والافعال ، ليس اطلاقا دليلنا الوحيد لانشـاء النصوص اللغويـة .

ماذا يحكم اختيار الكلمات عند انشاء جمل سليمة وفق القواعد ، ولا نقصد هنا الانشاء المنفذ من قبل آلة ، بل ذاك المناط بكائن بشري ، والذي تعلم من خلال خبرته الطويلة الكتابة والحديث وفق اصـول القواعد . لا يمكن الاجابة عن هذا السؤال باللجوء الى مفهوم المعنى دون تمحيص كاف ، اذ أن المعايير المستخدمة في انشاء النصوص اللغوية هي معايير معقدة للغاية . لقد درس الفلاسفة وعلماء النفس اسـتخدام الكلمات واللغات لاجيال متعاقبة واقاموا حولها النظريات ، ولكن يبدو ان استنتاج اي مقولة جديدة في هذا المجال هو امر صعب ناهيك عـن امكانية ان تكون تلك المقولة صحيحة على الاطلاق . نجـد في كتابات الاسقف بركلي من القرن الثامن عشر المتعلقة باستخدام اللغة آراء معقولة

يصعب على الباحث تقديم آراء جديدة دون العودة اليها وايفائها حقها كأساس في ابحاث اللغة .

يجد الشاعر الاصيل صعوبة بالغة في نظم شعره ، فعليه من جهة انتقاء الكلمات ذات الجرس الموسيقي المقبول والتي تؤدي المعاني المطلوبة. الى جانب حفاظها على الوزن والقافية المعتمدين . لذا لا يمكن ان تقيسم كلل الاشعار وفي نفس السوية فمنها ما يحقق الايقاع المطلوب الى جانب الوزن والقافية ، بينما يخلو في نفس الوقت من أي معنى .

ان انتقاء الكلمات ذات الجرس الموسيقي يتجاوز الشعر الى انواع الكتابات الاخرى ، خاصة اذا قصد الكاتب التاثير بشكل ما على القارىء ، وقد يعمد بعض الكتاب لاستخدام كلمات معينة ، بغية تحقيق هـذا الهدف كالخوف والحقد والحب وغيرها . تحرك كلمات مختلفة مشاعر كل منا في ظروف متباينة ، ويتعدى فعل الكلمات في بعض الثقافات الافراد الى المجموع ، اذ تؤثر فيهم جمل ومقاطع محددة ، تماماً كما تؤثر فيهم احداث متكررة او اصوات او مشاهد ذات مغزى .

لم يذكر بركلي نوعاً معيناً من الانفعال هو الانفعال المرتبط بالفهم وعملية المعرفة . ان تفوهنا بنماذج دارجة ومتعارف عليها من الكلمات في معرض مواجهتنا لبعض القضايا الغير واضحة ، يمكننا من ربـط انفعالاتنا الاليفة النافذة مع ارتباكنا وحيرتنا ازاء الحياة ، التاريخ ، طبيعة المعرفة ، الوعي والموت واضح ان هذه الفلسفة تعتمد الكلمات المتداولة لذا فان تقييمها يجب ان يستند الى اهمية مصداقية المشاعر الانسانية باكثر مما تستند الى مفهوم المعنى في اللغة .

يمكن ان يقضي احدنا اياما بكاملها في تفحص امثلة عن دوافع انتقاء الكلمات ، الا انه سيعود الى مشكلة المعنى على الدوام ، فكل شيء يبدو ضائعا بدون المعنى مهما كان ذلك المعنى لا يملك الشعر الصيني او النكتة الصينية الا اثرا ضئيلا علي الا اذا كان بامكاني ان اتفهم اللغة الصينية بنفس الطريقة والآلية اللتين يتعامل الصيني بهما مع لغته .

اعتقد انه من المناسب ان نعتبر اللغة نوعا من رموز الاتصال على الرغم من اعتراض كولين شيري ، وهو باحث في نظرية المعلومات . الا ان ذلك لا يعني أن اللغة هي نظام رموز سهل يتم وفقه وببساطة استبدال الفعل بالكلمة ، انها اشبه بأساليب الترميز القديمة حيث كانت تعتمد قائمة من الكلمات تصلح كل منها لترميز كلمة معينة او حرف محدد (وذلك لمنع التكرار) مرة اخرى ليست اللغة ببساطة هذه الاساليب ، فقوائمها تتداخل بعكس اساليب الترميز القديمة ، كما ان القاموس اللغوي لاي شخص يختلف عن القاموس اللغوي لأي شخص آخر ، مما يزيد في الارتباك والتشوش اذا اعتبرنا أن اللغة هي نظام ترميز غير كامل؛ فعلينا أن نعزو المعنى في نهاية المطاف الى الشخص ، ولهذا السبب ، ربما ان بعضنا يطرح السؤال التالي : ماذا تعني ، على الرغم من سماعه كلام الشخص الآخر بوضوح . يسعى الدارسون في هذا السياق ، لفهم مقاصد كتاب الذين قضوا منذ وقت طويل ، كما تسعى المحاكم لاستيعاب مقاصد الجهة المشرعة قبل استخدام النصوص القانونية .

لنفرض جدلا انني اقتنعت بكذب احد الاشخاص عندها احمل كلماته معان يحاول من خلالها تملقي او خداعي . بينما اذا اكتشفت ان الكومبيوتر استطاع صياغة جملة مفيدة استنتج على الفور ان الكومبيوتر يعمل بشكل جيد .

لا اظن ان مناقشتنا هذه هي من قبيل المحاكمة ، اذ أن ما يدفعنا الى هذه الاعتبارات عن المعنى ، افتراضنا الاولي بأن اللغة هي جملة ترميز للاتصالات غير كاملة ، وتستخدم في بعض الاحيان بشكل غير نسيق . اما الأمر الاكيد ، فهو اننا ما زلنا بعيدين جدا عن الاحاطة الكاملة بهذه القضايا .

وعلى كل حال ، تمتلك الجمل السليمة وفق الاعراب معنى شكلياً بصرف النظر عن النية او القصد . واذا كان في حوزتنا نظام اعراب مرض فيمكن للآلة استخدامه لبيان العلاقات بين مكونات الجملة كالفعل والفاعل

وغيرها ، اما المرحلة التالية فتتركز في البحث عن المعنى الشكلي للجملة ، ويعني ذلك ربط مختلف الكلمات بالاشياء على تنوعها والخصائص والاعمال او العلاقات في العالم من حولنا ، بما في ذلك المجتمع الانساني ونظام معرفتـــه .

لا نجد اي صعوبة من خلال سياق الاتصالات عبر حياتنا اليومية ، في ربط الكلمات المستعملة بالاشياء والخصائص والافعال والعلاقات ، مثلا لا يمكن لاحد ان يشتكي من غموض جملة تنطوي على طلب اغلاق النافذة كقولنا : اغلق النافذة الشمالية ، او جملة اخرى تثبت حقيقة معروفة مثل : الملك لويس ميــت . أن هاتــين الجملتين بســيطتان فعلاً وتتعلقان بمواضيع بسيطة من المحيط ، فجميعنا نعلم ما معنى نافذة واين هي جهة الشمال ، كذلك لايحتاج الأمر معرفة معمقةبالتاريخ بقية الحديث عن موت الملك لويس ، فكل منا قد سمع بحادث موت أو شاهده ، أما عن الملك لويس فهناك عدد كبير من الملوك بهذا الاسم . تبقى هنا قضية إجرائية بحتة ، إذ قد لا تسمع الجملة أو تدرك جيداً للوهلة الأولى ، فيطلب السامع ببساطة اعادتها .

ولكن ماذا لو تصورنا الانسان الاول : انسان الكهوف وهو يواجــه طلباً كهذا : اغلق النافذة الشمالية ، لا شك سيكون في حيرة من أمره ، تماماً كحالنا الآن ازاء التساؤل الكبير : هل الفيروسات حية او ميتة .

يبدو أن معظم الارتباك والحيرة المتسبب عن محاولة ربط الكلمات بمكونات العالم قد نشأ من محاولات الفلاسفة بدءاً من افلاطون وحتى لوك التي انصبت على البحث عن المعاني المقابلة لافكار مثل : نافذة ، قطة ، أو ميت ، وتركز ذلك البحث على ربط تلك الافكار بأفكار اخرى اكثر عمومية او بأمثال نموذجية . يفترض فينا وفق ذلك ، ان نميــز النافذة بمشابهتها لفكرة عامة عن النافذة : لنافذة نموذجية في الواقع ، وان القطة كذلك بمقارنتها مع قطة نموذجية تنطوي على كــل ميزات « القططية » . يشير بركلي الى ان الفكرة المجردة عن المثلث او المثلث

المثال يجب في نفس الوقت الا يكون حاداً او قائماً او متساوي الاضلاع او متساوي الساقين ، انه كل هذه الاشياء وليس احداً في نفس الوقت .

عندما يعلن الطبيب موت احد الاشخاص فانه انما يفعل ذلك استناداً لبعض المؤشرات الظاهرة التي لا يجدها في الفيروس . واكثر من ذلك ، فعندما يشخص الطبيب مرضاً ما ، لا ينطلق في عمله من مقارنة حالة المريض مع صورة نموذجية للمرض . ان ما يتناوله الطبيب لدى مواجهته المريض هو المظهر العام للمريض ، اضافة لتفاصيل اخرى كدرجة الحرارة والنبض ولون الجلد والتهاب الحلق وغيرها ، كذلك يأخذ الطبيب بعين الاعتبار بعض العلائم التي قد يلفت المريض نظره اليها . ترتبط بعض الاعراض والتظاهرات بمرض معين ، كما تفضي التحاليل المخبرية والدراسات المفصلة الاخرى الى المفاضلة بين الامراض التى تشترك في اعراض متشابهة .

يحدد عالم النبات ، وبشكل مماثل ، صنف معين من النباتات ، سواء اكان معروفاً أم لا وفق قائمة من المواصفات قد يتواجد بعضها بينما يكون البعض الآخر غائباً ، كالحجم واللون ومساحة الاوراق وتوضعها وغير ذلك . تلعب بعض المواصفات دوراً حاسماً في التفريق بين النباتات ، مثلاً خصائص اوراق النباتات ذات الفلقة وخصائص أوراق النباتات ذات الفلقتين ، بينما لا يكون لبعض المواصفات الاخرى ، كحجم الورقة مثلاً ، الا دوراً موجهاً وحسب . يخرج التحليل النهائي بالباحث وقد كون قناعة انه كان على حق ، او على الاقل انه على استعداد للاقتناع انه كان على حق ، واخيراً يمكن أن يكون النبات وببساطة من صنف جديد .

وهكذا يوضح النشاط اليومي للطب وعلم النبات غياب المرض النموذجي او النبتة المثالية بالمقارنة مع المعايير النفعية الواقعية . وبدلاً من ذلك ، تتوفر قوائم من المواصفات ، لبعضها امكانية التقرير ، ولبعضها الآخر صفة التوجيه وحسب .

تعززت اهمية هذه الملاحظة وبشكل قوي من خلال العمل الجاري حالياً لحمل الآلة على تنفيذ مهمات التمييز والتصنيف . لقد اخطأ البحاثة الاوائل باتباعهم آراء بعض الفلاسفة فحاولوا تطبيق فكرة مقارنة الحرف مع حرف نموذج او المخطط الموجي للصوت ، مع مخطط موجي مثال ، وكانت النتائج مروعة . فقد تم تصميم آلة للمقارنة أسميت اودري كانت مملوءة بالذاكرات ومخازن المعلومات ، واستطاعت تمييز الارقام المنطوقة باصوات مختلفة ، الا ان اخطائها كانت كبيرة جداً . نستنتج بذلك ان الدماغ الانساني لا يعمل وفق طريقة المقارنة مع النماذج الا في حالات بسيطة محدودة ، ناهيك عن احتمال ان عمله قد لا يكون بهذه الطريقة اطلاقا .

يقوم الباحثون الاكثر تقدماً في ميدان الادراك بدراسة المزايا الرئيسية والنقاط البارزة ، وكمثال على ذلك نعتبر الحرف ن فنصفه بكون نصف دائرة دون زوايا او تغيرات في الانحناء ، تعلوها نقطة .

بنى ل. د. هارمون عام ١٩٥٩ في مخابر بيل جهازاً بسيطاً يزن عدة كيلو غرامات كان بامكانه التمييز بين الارقام العشرية . ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ اذا كتبت ليس بالرموز وانما بالكلمات وبخط واضح لم يكن ذلك الجهاز ليقارن الكتابة بنماذج مثالية ، بل كان يصيغ استنتاجاته اعتماداً على ملاحظات محددة : كم مرة ارتفع القلم وهبط عبر خطوط معينة اثناء الكتابة ، هل هناك نقاط ، وخلاف ذلك .

لا يشك احد إطلاقاً ان الكلمات تشير الى صنوف من الاشياء والافعال وغيرها . يحيط بنا ويتداخل في حياتنا أصناف كثيرة من الاشياء والافعال نربط بها عادة كلمات معينة . تتضمن هذه الاصناف اشياء مثل (ازهار دوار القمر ، الفاصولياء) ، وحيوانات مثل (القطط ، الكلاب) وآلات مثل (السيارات ، الراديو) ، ومنشآت مثل (ابراج ، أبنية) والبسة مثل (قمصان ، بيجامات) وهكذا . كما تتضمن أفعالاً معقدة مثل لبس وخلع الثياب (يحاول شاردي الذهن ، بما فيهم مؤلف هذا الكتاب ،

اثبات انهم يستطيعون القيام بهذه الاعمال بشكل لاواعي) وأيضاً شد اربطة الاحذية (ويتميز هذا الفعل بصعوبة تنفيذه من قبل الاطفال) ، الى جانب الطعام ، قيادة السيارة ، القراءة ، الكتابة ، جمع الاعداد ، لعب كرة القدم أو كرة اليد (وهي افعال تنطوي على مهارات جزئية) ، واخيراً الاستماع الى الموسيقى وغيرها وغيرها ....

اميل الى الاعتقاد بأن ما يحدد صنفاً معيناً من الاشياء ليس النموذج او المثال ، بل قائمة من المميزات ، وهذا ينطبق على الافعال والعلاقات . لا نتوقع ان مثل هذه القوائم ستمكننا من تجزئة خبراتنا في زمر مغلقة منفصلة . بينما نجد مثل تلك الامكانية في لغة العلم سيما عندما نتناول قطاعاً ضيقاً من الخبرة ، الا ان خبرة الحياة اليومية تتجاوز مثل هذا الوضع ، فتقسيم الخبرة فيها أمر مستحيل الا اذا كانت الاقسام الناتجة غير شاملة وكذلك متداخلة وغير منفصلة . اعتقد على الرغم من ذلك انه بواسطة قوائم المميزات يمكننا تعريف الابواب ، النوافذ ، القطط ، القرود ، واشياء الحياة اليومية الاخرى . كما أميل الى الاعتقاد أن نفس الاسلوب سيمكننا من تحديد الافعال المألوفة كالركض والقفز ، وكذلك الرموز المستخدمة في الكتابة والكلام اي الكلمات .

وهكذا الخص وجهة نظري بالتأكيد على ان مثل هذا التناول قد يحقق آمالنا بجعل الآلة قادرة على تصنيف الاشياء والافعال بدلالة اللغة ، أو تمييز وتفسير اللغة بدلالة فعل ما او لغة أخرى . واعتقد أكثر من ذلك أن الكلمات التي ليس لها قائمة ميزات محددة ذات جذور واضحة في خبرات الحياة اليومية ، مثل تلك الكلمة يجب ان نقف معها موقف الحذر .

اذا دفعنا طموحنا لفهم اللغة بطريقة تمكننا من جعل الآلة قابلة للتعامل مع اللغة بنجاح كامل ، فعلينا ان نبحث عن قواعد واضحة للغة ، كما ان علينا اكتشاف العلاقات التفصيلية التي تربط الكلمات بالعالم من حولنا ، الا أن ذلك كله ليس كافياً . اذا اردنا التعامل مع

الجمل على أنها مؤدية لمعانٍ معينة ، فيجب أن نبحث عن تلك المعاني في الواقع ، بكلمة اخرى ان على هذه الجمل ان تترجم بصدق الحياة كما نعيشها .

لا تقدم الحياة اشياء جديدة وافعال جديدة في كل يوم ، اذ أن الجديد ، في واقع الامر ، يصنع من الاشياء المعتادة والافعال المألوفة ولكن في سلاسل أكثر تعقيداً ووفق تراتيب مختلفة وزمر متباينة . نحقق عملية التعلم في بعض الاحيان باضافة أشياء أو أفعال أو تراكيب من الاشياء والافعال الى جعبة خبراتنا ، وهكذا نغني أو نغير حياتنا . وقد ننسى الاشياء والافعال في احيان اخرى .

تتوقف افعالنا الخاصة على الاشياء والاحداث من حولنا . نتفادى سيارة في الطريق (هنا نميز سلسلة من الافعال المعقدة) . عندما نعطش، نتوجه الى اقرب مصدر مائي ونشرب (مسلسل آخر ولكن متواتر من الافعال المعقدة) . واذا تواجدنا في منطقة مكتظة فلربما قد ندفع الآخرين بالكتف كما فعلنا سابقاً . الا أن مصادرنا المعلوماتية لا تقتصر على الخبرة المباشرة ، وكذلك فتأثيرنا على الآخرين لا يحد بالدفع والمزاحمة ، اذا اننا نمتلك اداة قوية لتحقيق اهدافنا : اللغة والكلمات .

نستخدم الكلمات لنتعلم العلاقات بين الاشياء والافعال ولنتذكرها ، وكذلك لاصدار التعليمات للآخرين وتلقي التعليمات منهم ، واخيراً للتأثير على من حولنا بشكل أو بآخر . تتوقف فاعلية الكلمات على التطابق بين اسلوب فهم السامع لها وقصد قائلها ، أي على قابلية السامع لربط الكلمات مع نفس الاشياء والمهارات . اما اذا طلبنا من شخص ما القراءة أو جمع الاعداد ، في الوقت الذي لم يسبق لهذا الشخص أن مارس القراءة أو الجمع ، اي انه لم يسبق له ان اكتسب هذه المهارات، فان طلبنا باختصار سيكون عديم الفائدة . وبالمثل سيكون مضيعة للوقت والجهد أن نطلب من شخص آخر صيد الرويط بواسطة التيقذنب ، اذا هو لم ير هذين الشيئين سابقاً .

واكثر من ذلك ، فلكي تؤدي الكلمات فائدة لمستخدميها ، يجب أن تشير الى سلسلة واقعية أو ممكنة من الافعال . وهكذا سيبدو من غير المفيد أن ننصح شخصاً ما بالسير من لندن الى نيويورك بعد الظهر فور انتهائه من تناول وجبة الساعة السابعة .

وهكذا لا يقتصر اداء اللغة للمعاني على سلامة القواعد وعلى مقابلة الكلمات للاشياء والافعال وغيرها ، بل يعتمد ايضاً على تركيب العالم من حولنا . تضمنا هذه الحقيقة في مواجهة صعوبة بالغة اذا حاولنا ترجمة نص من لغة الى لغة اخرى وتصورنا أن بمقدورنا الحفاظ على جوهر المعنى الوارد في النص المترجم .

ان أحد اهم عناصر هذه الصعوبة هو الاختلافات في التصانيف ؛ فمثلاً يتمكن الناطق بالانكليزية من استخدام كلمة القدم ، أو مصطلح الرجل السفلى ، بينما لا يرد في اللغة الروسية الا كلمة واحدة بالمقابل . يملك الهنغاريون عشرين اصبعاً ، أو ان الكلمة لديهم هي نفسها لاي شيء ملحق . اذا تحدث اي منا عن الكلاب ، فهو يعني الكلب ذكراً كان ام انثى ، بينما كان الاقدمون اكثر حرصاً على التمييز بين الكلب والكلبة . يقال أن شعوب الاسكيمو تميز بين انواع من الثلج ، واذا رغبنا بفهم مقاصدهم ، فعلينا تعديل لغاتنا بما يستوعب صفات الانواع المختلفة من الثلج ، الا ان هذه الصفات ستكون ذات اهمية ضئيلة بالنسبة لنا ، لان تصنيف الثلج لم يبرز كقضية هامة في حياتنا . وهكذا فاجزاء العالم المشتركة بين ناطقي اللغات المختلفة والتي تحمل لهم المعاني على السواء، تقسم الى زمر متباينة وفق الناطقين بكل لغة . تستحيل الكتابة باستخدام لغات مختلفة لكلمات أو جمل بسيطة تقابل نفس المجال من الخبرة .

وتبقى بعد ذلك مشكلة اكثر عمقاً ؛ اذ ان الكلمات المأخوذة من لغات مختلفة والمقابلة لنفس الخبرة لا تغطي نفس المساحة من الخبرة . كيف يمكن أن ينقل المترجم الجملة التالية : ربط شريط الحذاء ، الى لغة

قوم يستخدمون احذية بدون شرائط . لن تحل المشكلة بتوصيف معقد من جانب المترجم . لربما يكون هناك معادل ثقافي في اللغة الاخرى . كيف يمكن أن نوفق بين ما قد نصادفه في قصة قديمة تروي عن شخص ما أنه بنى بيتاً ، فوفق الكاتب عنى ذلك الحفر والنقر في شجرة كبيرة ، أو كتلة صخرية صلدة ، بينما يعني بناء البيت في عصرنا استقدام المهندس والبناة والحديد والاسمنت وغيرها .

على انه من المرجح أن تكون الترجمة بين لغتين متقاربتين ناجحة بقدر ما اذا جرت تلك الترجمة على اساس مقابلة الكلمات أو مقاطع الجمل ، وان كانت بعض هذه المحاولات قد ادت الى ترجمة مقطع مثل: ابعد من النظر ووراء حدود العقل الى المقطع التالي : ابله اعمى . اما اذا كانت الفرق بين الثقافات واللغات كبيرة فان المترجم يفكر أولاً بمعاني الكلمات وفق الاشياء والافعال والانفعالات ثم يحاول اعادة كتابة هذه المعاني باللغة الاخرى . ومن الممكن ان الثقافة المرتبطة باللغة الاخيرة هذه لا تنطوي على مكافئات قريبة للاشياء او الافعال الواردة في النص الاصلي، عندها يجد المترجم نفسه أمام حائط مسدود .

بالضخامة المشاكل التي سيواجهها من يحاول بناء آلة للترجمة . انه لن يستطيع تحقيق مراميه دون تأهيل الآلة بشكل ما للتعامل مع ما اشرنا اليه سابقاً على انه الفهم . لا يقتصر دور الفهم في مجال الترجمة من لغة لاخرى . ان كاتب السيناريو الذي يستطيع وبامانة ترجمة ونقل اساسيات مشهد موت عمة في أومسك الى مشهد موت اب في لوس انجلوس ، سيفشل بشكل متكرر اذا هو حاول اعادة صياغة جملة علمية ، ببساطة لان يعرف الكثير عن الحزن والقليل عن العلم .

نواجه الآن كلمة الفهم ، بعد أن علقنا لفترة وبشكل مؤلم مع كلمة المعنى . يبدو لكلمة الفهم معنيان . اذا فهمنا الجبر أو علم التفاضل والتكامل ، فنستطيع استخدام تقنياتهما في حل مسائل لم نواجهها سابقاً وبرهان نظريات لم يسبق أن برهنت . يتجلى الفهم هنا بقوة

الفعل والخلق وليس مجرد التكرار . يمكن ان نقول في هذا المعرض أن الكومبيوتر يستطيع الفهم الى حد ما ؛ اذ أن باستطاعته برهان بعض النظريات في المنطق الرياضي اذا تمت برمجته لهذه الغاية . الا أن هناك جانباً انفعالياً للفهم اذا استطعنا برهان نظرية ما بطرق متعددة وضممناها الى غيرها من الحقائق والنظريات بهدف التنسيق ، كذلك اذا تناولنا موضوعاً ما من مناظير مختلفة بغية اكتشاف علاقة طرق التناول المختلفة هذه مع بعضها ، قلنا في كل الاحوال اننا نتفهم القضية بعمق ، وغمرنا شعور عميق وحار بامكان تعاملنا معها . لربما شعر بعضنا بهذه الحرارة في احيان متفرقة دون أن تتظاهر القابلية لديهم ، اذ اتضح لدى الاختبار زيف دفىء المشاعر التي غمرتهم للحظات .

قادنا تناول اللغة من منظور نظرية المعلومات الى معارج مختلفة من امواج الكلمات حيث واجهنا احكام القواعد غير الكاملة واقتحمنا مجاهل المعنى والفهم . يظهر كل ذلك المدى الواسع الذي قد يندفع المرء فيه بسبب الجهل . سنظهر بمظهر مضحك فعلاً ، اذا حاولنا التأكيد على أن نظرية المعلومات او اي شيء آخر قد مكنتنا من حل مشاكل اللغويات ، المعنى ، الفهم ، وفلسفة الحياة . وما يمكننا قوله في أحسن الاحوال أننا نندفع قليلاً ابعد من القيود الميكانيكية للغة في محاولة كشف الخيارات التي تسمح بها اللغة . ان ذلك يلفت الانتباه الى مسائل تتعلق باستخدام ووظيفة اللغة ، الا انه لا يبرهنها . واخيراً فربما يفضل القارىء مشاركتي جهلي المقدم مجاناً فيما يتعلق بهذه الامور او لعله يود الاستمتاع بجهله الخاص .





الفصل السابع

الترميز الفعال

لن نستطيع ممارسة فهم الطبيعة مرة اخرى كما فهمها قدماء اليونان . إذ ان التفسير العام للظواهر المألوفة من خلال عدد قليل من المبادىء الشاملة لم يعد مرضياً البتة . اننا نعلم اليوم الكثير ويجب ان نفسر الكثير مما فات قدماء اليونان . كما يجب أن نحرص على ملائمة نظرياتنا للمجال الواسع من الظواهر التي حاولوا تفسيرها . نؤكد انهم زودونا بدليل عمل مفيد وليس بأسلوب عقلنة العالم . تتجلى عظمة ميكانيك نيوتن في انها مكنت من التنبؤ بمواقع الكواكب والأقمار الصنعية وكذلك من فهم مجموعة من ظواهر الطبيعة الأخرى . نحن اكيدون أن ميكانيك نيوتن لم يكن السبب في تحريك ودعم الفهم الميكانيكي للحياة والكون .

يشعر الفيزيائيون المعاصرون انهم راضون تماماً عن اعتقادهم المتضمن امكان تفسير كل خواص المادة (عدا النووية منها) بواسطة قوانين الميكانيك الكوانتي ، بما فيها الخواص الفيزيائية ، الكيميائية ، والحيوية ، وذلك باستخدام فرض بسيط ينص على وجود الالكترونات وعدة انواع من نوى الذرات . إلاّ ان ما يحير ويربك فعلاً ان الجملة الفيزيائية الوحيدة التي حسبب خواصها ودرست بشكل كامل هي ذرة الهيدروجين المنعزلة .

يستطيع الفيزيائيون تفسير ظواهر فيزيائية اخرى بدقة بالغة والتنبؤ بها ، كما يستطيعون تناول ظواهر فيزيائية مختلفة بطرق نصف حسابية . إلا ان التناول النظري الدقيق دون العودة الى المعلومات التجريبية ما زال قاصراً بالنسبة لمجموعة من الظواهر الحرارية ، الميكانيكية ، الكهربائية ، والكيميائية وعماد هذا التناول النظري هو كما ذكرنا الميكانيك الكوانتي المطبق بشكل رئيسي على النوى والالكترونات . إن تتبع العمليات البيولوجية المعقدة حتى اصولها في المبادىء الكوانتية يبدو امراً بالغ الصعوبة لدرجة يبدو معها الميكانيك الكوانتي قليل الأهمية بالنسبة للبيولوجيا . ويبدو الأمر كما لو اننا وضعنا اليد على فرضيات قطاع هام من الرياضيات ولم نستطع إلا برهان بعض النظريات البسيطة .

وهكذا يحيط بنا في العالم جملة معقدة من الظواهر والمشاكل تتجاوز آمالنا بامكان احاطتها بنظرية شاملة واحدة مهما كانت تلك النظرية صحيحة من حيث المبدأ . لقد ظلت مشاكل العلم التي نربطها عادة بالفيزياء هي الأكثر اثارة وتحريكاً حتى وقتنا هذا بالمقارنة مع جوانب الطبيعة الأخرى التي ما زالت تحيرنا ، وإن كان قد دخل مؤخراً حلبة الاهتمام علمان جديدان : الكيمياء الحيوية وعلم وظائف الأعضاء .

اعتقد ، على كل حال ، ان المشاكل التي يطرحها التطور التكنولوجي المعاصر لا تقل تحدياً عن تلك التي نواجهها في الطبيعة . ما الذي يمكن ان يكون أكثر إثارة من محاولتنا كشف امكانات الكومبيوتر في برهان النظريات او في مماثلة انماط من السلوك تعودنا على وصفها بالانسانية. لا تقل تحدياً مشاكل الاتصالات الكهربائية . لقد أوت القياسات الدقيقة بوسائط كهربائية الى إحداث ثورة في فيزياء الصوتيات . كما افتتحت الدراسة المرتبطة بالاتصالات الهاتفية عهداً جديداً في دراسة السمع والمخاطبة إذ تبين ان الأفكار السابقة المتعلقة باللغويات غير كافية . هذا هو حقل دراسات نظرية الاتصالات حيث تتلاطم عشوائياً الجوانب الكثيرة للجهل الجديد والقلة الشحيحة المتوفرة من المعلومات .

اذا كان على نظرية الاتصالات ان تؤخذ على محمل الجد ، كما هي الحال مع قوانين نيوتن ، فعلى هذه النظرية أن تقدم لنا دليلاً جيداً فيما يتعلق بمشاكل نظرية الاتصالات ، ويجب أن تبرهن كذلك ان فيها مادة حقيقية ومستمرة تتجسد في بلوغ مستويات عالية من الفهم والقوة . وكما هو متوقع فإن البحث عن هذه المادة انما يجب ان يتم في مجال الارسال الدقيق والفعال للمعلومات . إن هذه المادة موجودة فعلاً ، وكما راينا فقد وجدت فعلاً وبشكل غير مفهوم بالكامل حتى قبل أن يوحدها عمل شانون ويجعلها سهلة الادراك .

نحتاج فهماً اساسياً وجديداً لمتابعة موضوع الارسال الدقيق للمعلومات ؛ وهذا سيكون موضوع الفصل القادم . إلاّ أن الفصول السابقة قد وضعتنا في موقع يمكننا من شرح بعض جوانب الارسال الفعال للمعلومات .

وجدنا أن انتروبي مصدر المعلومات مقدرة بالبيت لكل رمز او لكل ثانية تعطينا قياساً لعدد الأرقام الثنائية ، لعدد نبضات القطع والوصل لكل رمز أو لكل ثانية ، الضرورية لبث رسالة . نحتاج بعد معرفة عدد الأرقام الثنائية الضرورية للترميز والإرسال ، لاكتشاف طريقة عملية للترميز لا تستخدم من الأرقام الثنائية وفي أسوأ الأحوال إلاّ ما يزيد قليلاً عن هذا العدد الأصغري .

تقضي المستجدات في الرياضيات ، العلم ، أو الهندسة ، وعلى الدوام بالبحث عن طرائق ميكانيكية شاملة لحل المسائل . تنبع اهمية هذه الطرائق من انها تبرهن على إمكانية حل المشاكل ، إلاّ انها لا تبدو عملية في حالة القضايا المعقدة ، كما انها تكون غير مجدية اطلاقاً في بعض الأحيان . ونضرب مثالاً على ذلك توفر الحل الرياضي الدقيق لمعادلة الدرجة الثالثة ، إلاّ أن احداً ما لا يستخدمه في حالة المسائل العملية ؛ ويستخدم عوضاً عنه طريقة تقريبية مناسبة للمسالة المطروحة .

إن الشخص غير المبتدىء يفكر طويلاً في مسألة معينة عله يجد طريقة لتناولها افضل من مجرد التطبيق الآلي لما تعلمه . لنرَ الآن كيفية تطبيق ذلك على نظرية المعلومات ونعتبر أولاً حالة مصدر متقطع يولد سلسلة من الرموز او الأحرف .

رأينا في الفصل الخامس كيفية حساب انتروبي المصدر باختبار الاحتمالات النسبية لورود تراكيب الاحرف المختلفة . كلما ازداد طول التركيب تقترب القيمة المحسوبة من الانتروبي الحقيقية أكثر وأكثر . وتختلف الدقة المطلوبة حسب الحالة الخاصة المعتبرة ، فقد يشكل التركيب المكون من ٥ أو ١٠ أحرف أو ربما ١٠٠ حرف التقريب المطلوب للانتروبي .

رأينا أيضاً أن تجزئة الرسالة في تراكيب متتالية من الأحرف لكل تركيب منها احتمال ورود خاص به ، ومن ثم استخدام طريقة هوفمان في ترميز هذه التراكيب بأرقام ثنائية ، نقول ، ان هذه التجزئة وما تبعها ادت الى قيمة معينة لعدد الأرقام المخصصة لكل حرف وأن تلك القيمة اقتربت من الانتروبي أكثر بازدياد عدد الأحرف المساهمة في تشكيل التراكيب .

هذا هو نموذجنا الميكانيكي السهل ، فلماذا لا نستخدمه ببساطة في كل الحالات ؟

نطرح الحالة البسيطة التالية ، بهدف تبيان أحد الأسباب . نفرض أن مصدر رسائل معين يولد الرمز ٠ أو الرمز ١ وباحتمالين متكافئين ثم يكرر الرمز المولد مرتين قبل أن يعود مرة أخرى الى الخيار بين الرمزين ، وهكذا تبدو الرسالة المولدة من قبل هذا المصدر على الشكل :

٠٠٠ ١١١ ٠٠٠ ١٠١١١ ١٠١١ ٠٠٠١٠١٠٠٠ ١٠١١

هل يمكن لأحد أن يفقد عقله ويحاول تقسيم هذه الرسالة عبر محاولات متتالية في تراكيب اطوالها ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، .... من الرموز ، ومن ثم يحسب احتمالات تلك التراكيب ويرمزها بطريقة هوفمان ، ليرصد بعدئذ عدد الأرقام الثنائية المطلوبة للارسال ، ربما ان أحداً ما قد يقدم على ذلك ، إذ أن الغفلة عند الناس قد لا يكون لها حدود احيانـاً .

يبدو واضحاً ان طريقة ابسط لن تكون كافية فقط ، بل متكاملة بشكل مطلق . تساوي الانتروبي في هذه الحالة ⅓ رقم ثنائي لكل رمز من الرسالة المتكررة ، إذ أن هذا التكرار يحافظ على نفس القيمة للانتروبي لكل ثلاثة رموز متماثلة انتقي اولها وفق احتمال متساوٍ بين الـ . والـ ١ . نحقق الإرسال الفعال لهذه الرسالة بأن نكتفي بإرسال رمز واحد من كل ثلاثة رموز متماثلة ونطلب من المستقبل تكراره ثلاثة مـرات .

صحيح أن هذا المثال بسيط . إلاّ أنه هـام ، فهو يؤكد ضرورة استقصاء التركيب الطبيعي لمصدر الرسائل ولمزاياه البارزة التي يمكننا الاستفادة منها .

توضح دراسة النصوص اللغوية في الفصل الرابع هذه النقطة . يمكننا مثلاً إرسال النص كصورة بواسطة التلفزيون او البث الراديوي إلاّ أن ذلك يستهلك عدداً كبيراً من الارقام الثنائية لكل رمز ، فمثل نظام الإرسال هذا يمكنه إرسال النصوص اللغوية من اي لغة اخرى وكذلك صور الأراضي والعواصف والزلازل وغيرها . ونكون قد اهملنا خصوصية النص وأهم حقيقة عنه ، كونـه مؤلف من الأحرف ، ولم نستفد من ذلك إطلاقاً .

اذا رمزنا النصوص الانكليزية حرفاً بحرف غاضين النظـر عن الاحتمالات المختلفة لـورود الأحرف المتباينة ، ومستثنين الفراغ ، لاحتجنا الى ٧ر٤ رقم ثنائي لكل حرف . اما اذا اخذنا بعين الاعتبار احتمالات ورود الاحرف كمـا فعل مورس ، للزمنا ١٤ر٤ رقم ثنائي لكل حـرف .

اذا تقدمنا بآلية ميكانيكية في عملية ترميزنـــا للنصوص الانكليزية بشكل اكثر كفاءة ، لقمنا بترميز أزواج الأحرف ثم تراكيبها الثلاثية ، وهكذا . إلا ان هذه الطريقة ستفضي الى ترميز عدد كبير من النصوص، هي في واقع الامر ليست نصوصاً لغوية مقبولة ، وهذا يدفعنا الى اعتبار التركيب الأعلى للغة : الكلمة . وقد بينا في الفصل الرابع ان مثل هذا الاعتبار يخفض عدد الارقام الثنائية اللازمة لترميز كل حرف الى ٧ر١ اي الى حوالي ٩ ارقام ثنائية لكل كلمة .

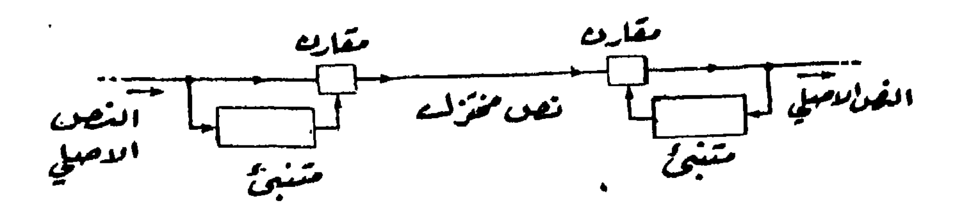
اما إذا رغبنا بمزيد من التقدم ، فعلينا دراسة العبارات والجمل ، وهذا يصل بنا الى القواعد . ان المشكلة هنا هي حقيقة كوننا لا نملك جملة متكاملة من احكام القواعد ، وانه حتى لو امتلكنا مثل هذه الجملة فإن نظام الاتصال الذي سيستخدمها لا شك سيكون معقداً بدرجة كبيرة . لا زال من المرغوب في الحالات العملية ترميز الأحرف الانكليزية بشكل مستقل مما يستدعي استخدام ٥ أرقام ثنائية لكل حرف .

لعله من الأهمية بمكان ان نأخذ فكرة عما يمكن أن ننجزه عبر ارسال النصوص اللغوية . افترض شانون ، لتحقيق هذه الغاية ، وضعية الاتصالات التالية . نفرض اننا طلبنا من شخص ما أن يحزر مستخدما كل معرفته باللغة الانكليزية ، ماذا سيكون الحرف التالي في نص معين . اذا كان الحزر صحيحاً ، اخبرنا صاحبه بذلك ، وطلبنـــا منه كتابة الحرف ، اما اذا كان خاطئاً ، فإما ان نخبره بالحرف الصحيح او نطلب منه تكرار الحزر حتى يصل الى الحل الصحيح .

نفرض الآن ان هذه العملية تجري عند المصدر ، وان توأما للشخص المعني يقبع عند المستقبل ، وان هذا التوأم يطابق الشخص عند المصدر في كل شيء ، بما في ذلك الحزر الصحيح والخاطىء . وهكذا فلإرسال النص نطلب من الشخص عند المصدر أن يحزر ، واذا كان حزره

صحيحاً ، كان حزر التوام عند المستقبل صحيحاً ايضاً . وهكذا نحتاج لإرسال المعلومات الى التوام عند المستقبل فقط في حالة الحزر الخاطىء للشخص عند المصدر وعندها يجب ارسال ما يكفي من المعلومات كي يتكمن الأشخاص عند المصدر وعند المستقبل من كتابة الحرف الصحيح.

رسم شانون مخططاً لنظام الاتصالات هذا موضحاً في الشكل ٧ ــ ١



الشكل ٧ ــ ١

يعمل المتنبىء على النص الأصلي ، ثم يقارن الحزر مع الحرف الصحيح ، فاذا لوحظ خطأ ما ، ارسلت بعض المعلومات . يجري التنبؤ عن الحرف التالي عند المستقبل بالاستناد الى النص المعاد إنشاؤه . تجري بعد ذلك مقارنة للاشارة المستقبلة ، فإذا لم يكتشف اي خطأ ، يتم استخدام الحزر ، وإلاّ يستخدم النص المختزل لإصلاح الخطأ .

لا نملك في واقع الامر مثل هذا التوام او اي متنبىء فعال مماثل . وعلى الرغم من ذلك فقد تم استخدام نظام لإرسال الصور يستند اساساً على الشكل ٧ ــ ١ وهو في واقع الأمر ذو طابع ميكانيكي صرف وابسط من الشكل المذكور . لقد كان هدف شانون مختلفاً على كل حال، فقد اكتشف سرعة الارسال المطلوبة في هذا النظام وذلك باستخدامه شخص واحد فقط واستغنائه عن التوام ودراسة الأخطاء التي يرتكبها هذا الشخص عند المصدر . لقد لخص النتائج الشكل ٥ ــ ٤ من الفصل

الخامس . يمكن تحسين التنبؤ بالاعتماد على ١٠٠٠ حرف سابق عوضاً عن ١٠ أو ١٥ حرف . ويحتاج اصلاح الاخطاء في التنبوءات بين ٦ر٠ الى ٣ر١ رقم ثنائي لكل رمز . نستنتج انه بقدر صحة هذه النتيجة فان انتروبي النصوص الانكليزية تقع بين ٦ر٠ — ٣ر١ بيت لكل حرف .

يوفر المصدر المتقطع نموذجاً جيداً للبحث والمناقشة ، إلاّ انه لا اهمية على الصعيد العملي . اما السبب في ذلك فهو أن المعايير الحديثة للاتصالات الكهربائية تنص على استخدام عدد قليل من الأرقام الثنائية او نبضات القطع والوصل لإرسال النصوص الانكليزية . يجب أن نستعجل انفسنا كي نستطيع النطق بحوالي مائة كلمة في الدقيقة ، إلاّ انه أمر في منتهى السهولة أن نرسل ١٠٠٠٠ كلمة عبر سلك الهاتف في كل دقيقة او ١٠ ملايين كلمة عبر قناة تلفزيونية في كل دقيقة ، ويمكن من حيث المبدأ وليس من الناحية العملية إرسال أكثر من ٥٠٠٠٠٠ كلمة في الدقيقة عبر القناة الهاتفية وحوالي ٥٠ مليون كلمة في الدقيقة عبر القناة التلفزيونية . لقد تخلينا في واقع الأمر عن ترميز مورس الذي يُرسل بموجبه الحرف E بسرعة أكبر من الحرف Z . تستخدم الأنظمة الحديثة نفس طول الاشارة لكل حرف .

تبرز اهمية الترميز الفعال والكفؤ في حالة إرسال الأصوات بأكثر مما تبرز في حالة ارسال النصوص ، ذلك لأن الصوت يحتاج كمية أكبر من الأرقام الثنائية لكل كلمة بالمقارنة مع النص المكتوب ، وأكثر من ذلك فالترميز الفعال اعظم اهمية في حالة التلفزيون منه في حالة الصوت .

ان الإشارة التلفزيونية او الصوتية هي إشارة مستمرة ، اذا ما قورنت بالنصوص اللغوية ، الاعداد ، او الأرقام الثنائية التي هي اشارات متقطعة . واذا استثنينا استخدام الأحرف الكبيرة والفواصل والاشارات الخاصة، تحتوي النصوص الانكليزية على الأحرف والفراغات وحسب . تتميز الموجة الصوتية او الصوت الانساني وفي كل لحظة بضغط معين ضمن مجال معين من الضغوط . سبق ورأينا في الفصل

الرابع انه اذا كانت تواترات الإشارة المستمرة محدودة ضمن مجال عرضه س ، فيمكن تمثيل الاشارة بعينات او قياسات للسمات عددها ٢ س في كل ثانية .

نتذكر على كل حال ان الانتروبي لكل رمز تتوقف على عدد القيم التي يمكن لهذا الرمز أن يأخذها ، وبما ان الاشارة المستمرة يمكنها ان تتخذ عددا لا نهاية له من القيم عند قياس عينة ما ، فإننا نندفع الى الاستنتاج بأن انتروبي الاشارة المستمرة ستبلغ قيمة لانهائية من واحدات البيت في الثانية ولكل عينة .

تتوقف صحة هذا الاستنتاج على رغبتنا باستعادة الاشارة المستمرة مطابقة لشكلها الاصلي بصورة دقيقة . يهدف ارسال الاشارة الى عرضها او إسماعها ، لذا فلا تتطلب استعادتها الا درجة معينة من التقريب ، وهكذا فقد حدد شانون وبهدف التعامل مع الإشارات المستمرة معيارا للامانة . ان تحقيق هذا المعيار لدى استرجاع الاشارة المستمرة لا يستلزم الا عددا محددا من الارقام الثنائية لكل عينة او لكل ثانية . نثبت اذن أن انتروبي المصدر المستمر لها قيمة محددة من واحدات البيت لكل عينة او لكل ثانية ، اذا اخذنا بعين الاعتبار التقريب المقبول والمعين الذي يفرضه معيار الامانة .

يجب أن يرتبط معيار الامانة بالامتدادات الطويلة للاشارة وليس بالعينات فقط . وهكذا اذا ضخمنا كل عينة بمقدار ١٠٪ لدى ارسالنا الصوت فان ما سنحصل عليه هو مجرد صوت اعلى دون المساس بنوعية وجودة الصوت . اذا ارتكبنا خطأ عشوائي مقداره ١٠ ٪ في كل عينة فستمتلىء الاشارة المسترجعة بالضجيج . وبشكل مماثل ، اذا اعتبرنا بث الصور وحدث خطأ متدرج عبر الصورة سواء باللمعان أو التباين فان هذا الخطأ سيمضي دون ملاحظة ، أما اذا لم يكن الخطأ متدرجا بل تغير من نقطة لاخرى ، فسيكون من المستحيل احتماله .

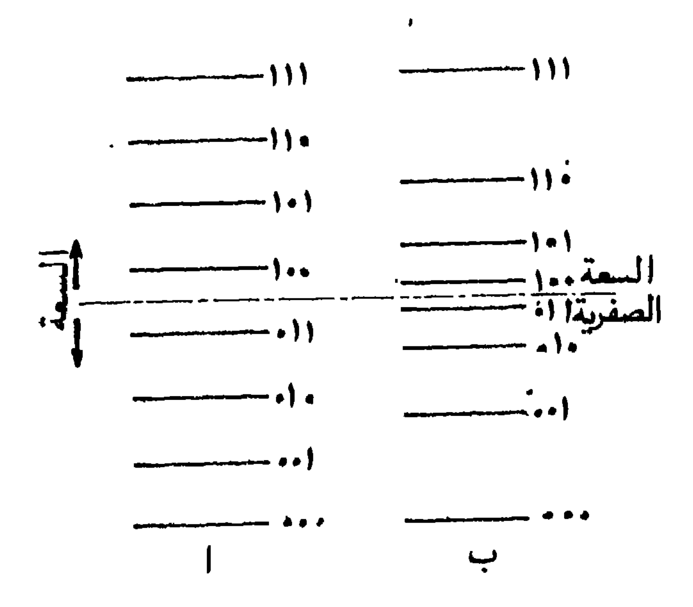
راينا انه من الممكن ارسال اشارة مستمرة بجعل عيناتها تتخذ قيما محددة فقط ، ويبدو ان ١٢٨ قيمة تكفي لارسال الحوار الهاتفي أو الصور يجب ان نلاحظ ، ان عملية تحديد العينات في اشارات التخاطب أو الصور تعتبر في عداد العمليات الغاية في البساطة كما هي الحال في حالة ترميز الرسائل حرفا بحرف عوضا عن ترميزها كلمة بكلمة .

يمكن أن تتجاوز عملية اخذ النماذج من الاشارات المستمرة الى اعتبار اكثر من عينة في وقت واحد . ولعل هذا هو الطريق السليم للترميز الفعال والكفوء للاشارات المستمرة ، الا انن تنفيذ مثل هذا العمل هو امر صعب فعلا ، اذ أن العينات يتنم حصرها بشكل مستقل سواء في نظم تعديل رموز النبضات التي تنقل المخابرات الهاتفية من مقسم هاتفي الى مقسم آخر ومن بلدة لاخرى او في المقاسم الرقمية التي تؤمن المخابرات الابعد . كذلك تحصر العينات بشكل مستقل عند استقبال الصور الواردة من المريخ والمشتري والكواكب الابعد .

تعتبر عدة سويات او سمات في حالة نظم تعديل رموز النبضات ، وتربط اقرب سوية أو سمة بكل عينة ، واذا استخدمنا كمثال ثمانية سويات فنجعل خيارنا لها بحيث تتباعد عن بعضها بمسافات متساوية كما يوضح الشكل ٧ ــ ٢ . يرسل المنسوب الممثل للعينة ببث الرقم الثنائي المثبت على يمين المنسوب .

نستطيع ان نذهب بالترميز ابعد من ذلك فنضيق المسافات بين المناسيب ، فبدلا من المسافات المتساوية بينها كما في الشكل ٧ ــ ٢ ــ أ نستطيع تضييق المسافات بين المناسيب للاشارات الصغيرة وزيادتها للاشارات الكبيرة كما يوضح الشكل ٧ ــ ٢ ــ ب .

ان سبب هذا ، هو بالطبع ، أن آذاننا حساسة لاي تغير طفيف في الضغط فوق او تحت المعدل اكثر بكثير من حساسيتها للتغيرات الكبيرة جدا بالنسبة لهذا المعدل وما يقابلها من تغيرات مقابلة موجبة أو سالبة



الشكل ٧ – ٢

في كمون الاشارة . يؤدي ضغط السعات العالية عند المصدر وتحديدها مرة اخرى عند المستقبل الى تخفيض عدد الارقام الثنائية اللازمة لكل عينة مع الحفاظ على جودة الارسال وذلك بالمقارنة مع الحالة التي نحافظ فيها على فروقات ثابتة بين السعات ، ويسجل هذا الانخفاض ٤ ارقام ثنائية : من ١١ الى ٧ .

يترتب علينا تحقيق دراسة شاملة للصوت والسمع اذا رغبنا بارسال اكثر فعالية للتخاطب ، وجل ما يلزمنا لاقناع السامع بجودة الارسال هو تحقيق دقة معقولة في البث .

ليست الفعالية هي كل شيء . لا يستطيع مرمز الاصوات ارسال اكثر من صوت واحد في وقت واحد ، كما ان هذه المرمزات تتصرف بشكل

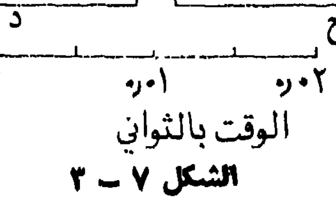
سيء اذا تكلم المرسل في جو من الضجيج . نتمكن من تجاوز هذه الصعوبات بتحقيق ارسال اكثر فعالية لموجة الصوت ، وهو ما يسمى بتحليل الموجة ، الا ان عدداً من الارقام الثنائية مساو لـ ١٥٠٠٠ — ٢٠٠٠٠ رقم في كل ثانية يبقى ضروريا للتخاطب المقبول .

يوضح الشكل ٧ — ٣ اشكال مختلفة لامواج التخاطب الصوتية ، اي تغير ضغط موجة الصوت مع الزمن ، وما يقابله من تغير في الكمون الكهربائي الممثل له . نلاحظ ان بعض الاشكال الموجية تكرر نفسها بدقة ، سيما في حالة الاحرف الصوتية الانكليزية (بدءا من الشكل ٧ — ٣ — أ حتى ٧ — ٣ — د) . او ليس من الممكن في هذه الحالة ارسال الشكل النموذجي للموجة واستخدامها من ثم خلال ادوار متكررة لاحقة . الواقع ان هذا من الصعوبة بمكان ، اذ ان الآلة لن تستطيع تحديد الدور الواقعي للحرف من خلال الكلام المنطوق ، فلقد تم تجريب هذا الامر وكان الكلام الناتج مفهوما الا انه كان مشوها بدرجة كبيرة .

ينبغي استخدام طرق اكثر عمومية اذا اردنا ترميز الكلام المنطوق بشكل فعال . يجب ان نعلم اولا عدد الاصوات المختلفة التي يجب ارسالها وما مدى تحسس اسماعنا ازاء مشكلة تمييز هذه الاصوات عن بعضها .

يتغير ضغط الهواء الممثل للاصوات بشكل سريع ، وتصل سرعة هذا التغير الى مرتبة عدة آلاف في الثانية ، بينما تمارس ارادتنا التحكم في حبالنا الصوتية ببطيء بالغ ، وفي احسن الاحوال نغير نمط الانتاج الاصوات عدة عشرات من المرات في كل ثانية . لذا فالصوت يمكن ان يظهر لنا ، وهو في الواقع كذلك ، ابسط بالمقارنة مما قد نستخلصه من دراسة التغيرات السريعة في ضغط الامواج الصوتية .

ما هو نوع التحكم الذي نمارسه على اعضاء التصويت فنيا . نتحكم اولا باصدار اصوات مسموعة بواسطة تاثيرها في حبالنا الصوتية . هذه الحبال هي عبارة عن شفتين او ثنيتين من نسيج عضلي مرتبط الى علبة



الشكل ٧ ـ ٣

غضروفية تعرف باسم الحنجرة ، وهي ناتئة لدى الرجال وتعرف باسم تفاحة آدم . تكون الحبال الصوتية مفتوحة في حالة الصمت ، ويمكن تقريبها من بعضها بحيث ان الهواء المندفع من الرئتين بمروره بينهما سيتسبب باصدار أصوات معينة . يكون الصوت الصادر ذي تواتر عال جدا اذا كانت الحبال الصوتية جد قريبة من بعضها ؛ بينما ينخفض ذلك التواتر اذا ابتعدت الحبال عن بعضها .

تمتلك دفقات الهواء المارة عبر الحبال الصوتية تواترات كثيرة . يلعب الفم والشفتان دور مرنان معقد يبرز بعض التواترات اكثر من غيرها . وتتوقف هذه العملية على وضع اللسان داخل الفم ، وعلى مدى انفتاح الفتحتين الانفيتين على الفم والرغامى وكذلك على مقدار انفتاح الفم ووضع الشفتين .

يتم النطق بالاحرف الصوتية وغيرها من الاحرف وكذلك تنويع اشكال التصويت عن طريق حث الحبال الصوتية واعطاء هيئات مختلفة للجوف الفموي .

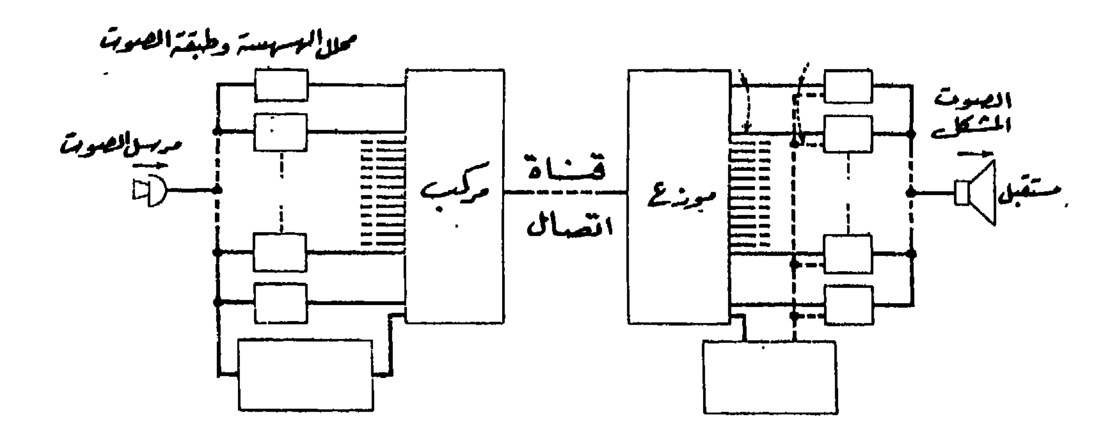
تتم صياغة الاصوات الخاصة ببعض احرف اللغة الانكليزية مثل : t , g , b , p بايقاف المجرى الصوتي عند عدة نقاط بواسطة اللسان أو الشفتين ، مما يخلق ضغطا هوائيا ، لا يلبث ان يطلق فجأة . تستخدم الحبال الصوتية في انتاج بعض الاصوات ، كالصوت الخاص بالحرف الانكليزي B ولا تستخدم في انتاج أصوات اخرى كالصوت الخاص بالحرف P ..

وماذا عن بعض الاحرف والتراكيب الاخرى مثل SH , S . . الواقع أن اصدار الاصوات الخاصة بها يتم عبر انقباضات مختلفة ، وتستعمل الحبال الصوتية في بعض الاحيان ، كما في الصوت الخاص بالتركيب ZH .

ان سرع التغير للاعضاء الصوتية هي اقل بكثير من الاصوات المنتجة الا يمكن أن نستخدم هذه الحقيقة في الترميز الفعال للتخاطب .

أخترع هومر دادلي من مختبرات بيل في الثلاثينات من هذا القــرن وقبل أبحاث شانون في نظرية المعلومات ، طريقة من هذا الطراز لارسال المعلومات دعاها بمرمز الاصوات . يوضح الشكل ٧ ـ ٤ وحدة الارسال (المحلل) ووحدة الاستقبال (المركب) من مرمز اصوات .

٧٠ ـ ٤



الشكل ٧ ـ ٤

يتغذي في المحلل بديل كهربائي للصوت الى ١٦ مرشحاً ، يحدد كل منها شدة الاشارة الصوتية في حزام معين من التواترات ومن ثم يبث الاشـــارة الى المركب الذي يعطي هــذه المعلومات . يجري كذلك تحليل آخر لمعرفة الأحرف غير الصوتية من الأحرف الصوتية ، وفي حالة وجود الآحرف الصوتية يتم اكتشاف طبقتها .

اذا كانت الأحرف الصوتية غائبة ظهر هسيس عند المركب ، واذا كانت موجودة صدرت سلسلة من النبضات الكهربائية بسرعة تناسب نفثات الهواء عبر الحبال الصوتية للناطق .

يمرر الهسيس أو النبضات عبر مجموعة من المرشحات ، حيث يمرر كل مرشح حزمة من التواترات مقابلة لمرشح معين في المحلل . يتم التحكم

بكمية الصوت المارة عبر مرشح معين من المركب بواسطة خرج المرشح المقابل في المحلل بحيث تكون هذه الكمية مساوية لما يشير لوجوده مرشح المحلل في الصوت وضمن ذلك المجال من التواترات .

تنتج هذه العملية الأصوات المفهومة . فما يتم هو أن المحلل يستمع الى الأصوات ويحللها ، ثم يصدر التعليمات للمركبْ ، والذي هو آلة ناطقة صنعية ، كي يقول كل الكلمات مرة اخرى بنفس اللهجة والطبقة الصوتية للناطق .

ان لمعظم مرمزات الأصوات لهجة كهربائية قوية وغير مستحبة . لقد قادت هذه المشكلة الى افكار جديدة حول العوامل المؤثرة على طبيعة الصوت ، الا أننا لن نتابع هذا الموضوع هنا . وتبقى مرمزات الصوت ، رغم ذلك مفيدة ، حتى المرمزات غير الكاملة منها . ويكون من الضروري أحياناً تشفير إرسال الأصوات . اذا اختزلنا الحديث الى ارقام ثنائية بتعديل ترميز النبضات ، يجب عندها ارسال من ٣٠٠٠٠٠ الى ٦٠٠٠٠٠ رقم ثنائي في كل ثانيـة ، ينخفض هـذا الرقم الى ٢٤٠٠ باستخدام مرمز الأصوات .

لا يمثل مرمز الأصوات في الشكل ٧ ــ ٤ الا نموذجاً من اصناف عديدة من الأجهزة ، نطلق عليها جميعاً اسم مرمزات الأصوات ، وتشترك بميزة تحليل الأصوات وارسال اشارات تحت آلات ناطقة . يجد التحليل في الترميز الخطي المتنبىء عوامل بطيئة التغير يمكنهـا التنبؤ بالعينة القادمة من الحديث على أساس مجموع عينات سابقة مأخوذة بأوزان مختلفة وفق اهميتها . يمكن بث إشارة خطأ ايضاً بهدف تصحيح خرج الآلة الناطقة . يعطي الترميز الخطي المتنبىء حديثاً جيداً اذا أرسل ٩٦٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، وحديثاً مفهوماً اذا ارسل ٢٤٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، واخيراً حديثاً واضحاً للغاية اذا هبط هذا الرقم الى ٦٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية .

يمكن استنتاج عوامل اخرى للحديث من عوامل التنبؤ الخطي . يمكن استنتاج اشارات القناة المميزة لمرمز اصوات القناة في الشكل ٧ ــ ٤

من عوامل التنبؤ الخطي . كذلك يمكن استنتاج تواترات الطنين لجهاز التصويت المميزة لاصوات مختلفة . لقد اقترح استخراج العوامل المؤثرة على جهاز التصويت وارسالها . اذا استطعنا استخدام هذه العوامل لتمييز الأصوات المختلفة للحديث ، وأرسلنا دلائلها وحسب ، لحصلنا على ما يسمى مرمز انواع الاصوات والذي يستطيع ارسال الحديث بنفس كفاءة و فعالية النص .

سنستعرض مرمز الاصوات بشكل سريع قبل اغلاق موضوعه .

لنلاحظ أن ارسال الاحاديث باستخدام أكثر مرمزات الأصوات اقتصادية يستلزم كمية من الارقام الثنائية لكل كلمة أكثر مما يلزم لإرسال النصوص المكتوبة . ويتعلق ذلك ، بشكل جزئي ، بالصعوبات التكنيكية في تحليل وترميز الاحاديث بالمقارنة مع النصوص المطبوعة ، اضافة الى اننا في حالة ارسال الاحاديث ، نبث المعلومات كما هي الحال في حالة النصوص ، اضافة لخصوصيات الاحاديث كنوعية الأصوات وطبقتها واللهجة وغيرها . بكلمة مختصرة إن انتروبي الأحاديث أكبر من انتروبي النص محسوبة لكل كلمة .

يتميز مرمز الاصوات عن غيره بقابليته ترميز الاحاديث بفعالية وكفاءة ، وسبب ذلك ان مكونات اجهزة التصويت تتغير ببطيء بالمقارنة مع تقلبات الامواج الصوتية التي تنتجها تلك الأجهزة . تعتمد فعالية مرمزات الأصوات أيضاً على حدود حاسة السمع لدى الانسان .

ان اكثر انواع الاصوات تعقيداً هو الهسيس كما في حالة نطق SH (الشكل ٧ — ٣ — و) ونطق SH (الشكل ٧ — ٣ — ز) ، كما أن نطق حرف S بشكل متكرر يرتب شكلا موجياً مختلفاً تماماً . ويقتضي الأمر عدداً كبيراً من الارقام الثنائية في كل ثانية لإرسال المنطوق في كل مرة ، أما بالنسبة للأذن الانسانية ، فيبدو النطق الأول لحرف الـ S مماثلا للنطق الثاني اذا كان له نفس محتوى التواترات بشكل عام . وهكذا لا يتوجب على مرمز الاصوات استعادة صوت الحرف S

الذي نطقه المتكلم ، بل تكتفي منه بتكرار الصوت S الذي له نفس محتوى التواترات تقريباً ، وبالتالي يكون له وقعاً متشابهاً .

يتضح اذن أن الترميز الفعال في ارسال الأحاديث يعتمد على تحديد نماذج بسيطة وهامة واعادة تشكيلها عند المستقبل . تبرز أهمية الترميز الفعال بشكل أكبر في التلفزيون بالمقارنة مع ارسال الأحاديث ، لأن القضية تتعلق هنا بقناة ارسال ذات سعة أكبر . هل يمكن تطبيق نفس المبادىء في حالة التلفزيون .

واقع الأمر إن مشكلة التلفزيون أعقد بكثير من ارسال الأحاديث المنطوقة ، وسبب ذلك بشكل جزئي أن حس البصر أكثر تفصيلا وتمييزاً من حس السمع ، ولأن التلفزيون يرسل صوراً شديدة التنوع ومن مصادر مختلفة ، بينما تتولد الأحاديث من نوع واحد من أجهزة التصويت .

وهكذا ، فلاستخدام طريقة شبيهة بمرمز الاصوات في حالة التلفزيون علينا أن نقصر ارسالنا التلفزيوني على نوع واحد من مصادر الصور ، كالوجوه الانسانية على سبيل المثال .

لنتخيل نموذجاً مطاطياً للوجه الانساني عند المستقبل . يمكننا حفظ مواصفات هذا الوجه في ذاكرة كومبيوتر ضخم . ينظر المرسل أولا الى الوجه الذي سيرسل ، ثم يقوم بتشكيل النموذج عند المستقبل بالشكل والهيئة . كما ان على المرسل أن يلاحظ مصادر الضوء ويكررها ذاتها بالشدة والاتجاه عند المستقبل . يتابع المصدر حركات العينين للشخص الذي يتكلم بالقرب منه ، وكذلك حركات الشفتين والفكين وخلجات العضلات الأخرى لكي يتمكن النموذج عند المستقبل من فعل الشيء المطابق . يبدو هذا التصور فعالا للغاية وسيكون اختراعاً عظيماً اذا استطاع أحد ما تحديد طريقة تنفيذ العمليات التي أتيت على ذكرها . ولكن ما أسهل الأمنيات وما أصعب الفعل (ينطبق ذلك على تأليف السيمفونية العاشرة لبيتهوفن ، أو تقليد لوحة كبيرة على شيء ما ، وكذلك على اختراعنا المنشود) .

لقد اصبحت آمال الناس غير المتحققة ، في عصرنا هذا عصر التطور العلمي والتكنولوجي غير المحدود ، ذات اهمية قصوى لدرجة تم معها استخدام مصطلح خاص للتعبير عن هذه الأحلام . هذا المصطلح هو الاختراق . تستخدم هذه الكلمة احياناً لوصف شيء غير مهم البتة وتافه ، قد تم انجازه فعلا .

اذا وضعنا جانباً أحلام المستقبل نجد ان كل نظم ارسال الصور تتبع نموذجاً واحداً . يتم مسح الصورة المراد ارسالها لاكتشاف شدة الاضاءة عند مختلف نقاطها ويجري ذلك عبر سلسلة من الخطوط المتوازية والمتقاربة ، وفي حالة التلفزيون الملون تقرأ ثلاثة أطياف بألوان مختلفة في وقت واحد . تحدث عند المستقبل العملية المعاكسة اذ يتم طبع النقطة الضوئية على نماذج مطابقة من الخطوط وفق شدة الاشارة القادمة والمتناسبة بدورها مع شدة اضاءة النقطة عند المصدر . تقتصر كل المحاولات التي جرت حتى الآن للترميز الفعال على طريقة المسح هذه .

يستخدم التلفزيون الملون طريقة ترميز متقدمة للغاية ، فشدة اضاءة الصورة في هذه الحالة دقيقة جداً ، بينما نموذج اللون اقل تفصيلا . وهكذا يمكن ارسال الصورة التلفزيونية الملونة المطابقة بتفاصيلها لصورة غير ملونة عبر نفس قناة الارسال لهذه الأخيرة . يستخدم التلفزيون الملون ، كما هو معروف ، اشارة تمثيلية أو تشبيهية ، اذ أن الصورة لا تختزل الى نبضات قطع ووصل منفصلة .

سيزداد بالتدريج استخدام تعديل ترميز النبضات لارسال كل انواع الاشارات بما فيها اشارات التلفزيون . سيتم مسح الصورة بالطريقة المعتادة ، الا أن شدة اضاءتها سترمز في سلسلة من الأرقام الثنائية التي تحدد شدة اضاءة عناصر متجاورة منفصلة من الصورة يسمى كل منها : بيكسيل وتقع جميعها على خط واحد . كانت هذه هي طريقة ارسال الصور من المركبات التي أمّت كوكبي المريخ والمشتري .

ان كل طرق الترميز التلفزيوني الفعال هي من النوع الرقمي . تتعامل هذه الطرق مع سلسلة من الأرقام الثنائية المثلة لاضاءة كل بيكسيل من خط معين .

تتغير شدة الاضاءة في مساحات كبيرة من شاشة التلفزيون بشكل متدرج وناعم من بيكسيل لبيكسيل . يمكن ، عبر هذه المساحات ، التنبؤ عن اضاءة البيكسيل التالي ، من خلال المعلومات المتوفرة عن اضاءة كل بيكسيل سابق في نفس الخط وربما في الخط السابق . ان كل ما تلزمنا معرفته عند المستقبل هو الخطأ في هذا التنبؤ ، لذا فما تقوم بإرساله هو الفرق بين شدة الاضاءة الحقيقية والشدة التي نتوقعها عند المصدر والمستقبل . سيكون التنبؤ بشكل ما سيء في المناطق المشغولة من الصورة ، لذا يصبح الفرق المرسل عندها كبيراً .

يمكننا ترميز فروق الاضاءة بأكثر ما يمكن من الكفاءة والفعالية باستخدام طريقة هوفمان وبحيث تمثل الرموز القصيرة فروق شدة الاضاءة الصغيرة الأكثر تواتراً ، بينما تمثل الرموز الطويلة الفروق الأكبر والأقل تواتراً . يؤدي تنفيذ هذا المخطط الى توليد الأرقام الثنائية المثلة لفروق شدة الاضاءة بسرع متباينة ، اذ ستكون تلك السرع منخفضة عند مسح المناطق المتدرجة الاضاءة من الشاشة ، وعالية في المناطق المشغولة من الشاشة . يجب أن تغذي هذه الأرقام الى منظم معلوماتي بغية ارسالها بسرعة ثابتة ، اذ يخزن هذا المنظم الأرقام الواردة اليه ثم يعيد ارسالها وفق السرعة الثابتة المساوية للسرعة الوسطية التي تتدفق وفقها المعلومات اليه . يجب استخدام منظم معلوماتي مماثل عند المستقبل .

يرتب استخدام هذا النظام في الترميز ، بهدف تحقيق ارسال تلفزيوني جيد ، تخفيض عدد الأرقام الثنائية اللازمة في كل ثانية بنسبة $\frac{1}{2}$ الى $\frac{1}{3}$ بالمقارنة مع عدد الارقام الثنائية المستخدمة في حالة ترميز شدة الاضاءة عند كل بيكسيل .

يمكن تحقيق نجاح اكبر بتخزين شدة الاضاءة عند كل بيكسيل من الصورة السابقة واستخدامها من ثم في عملية التنبؤ عن شدة الاضاءة في

البيكسيل التالي المبغي ارساله ، وتظهر فعالية هذه الطريقة أكثر عندما نرسل صورة تجمع من الناس على خلفية ثابتة ، اذ لا تتغير شدة اضاءة كل بيكسيل من الخلفية لدى الانتقال من صورة لأخرى .

تستخدم بعض النماذج التجريبية الأعقد حقيقة أن حركة شكل ما على خلفية معينة تتم بإيقاع اجمالي . وهكذا يمكن التنبؤ بشدة اضاءة كل بيكسيل في الشكل المتحرك من اضاءة بيكسيل آخر على بعد ثابت في الصورة السابقة .

اذا مثل كل بيكسيل من الصورة التلفزيونيـة بـ ٨ أرقام ثنائيـة (في حالة صورة ممتازة) ، فيمكن ارسال هذه الصورة باستخدام ١٠٠ مليون رقم ثنائي في كل ثانية . واذا استخدمنا التطويرات في الترميز التي أشرنا اليها للتو ينخفض هذا الرقم الى ٣٢ مليون وقد تم تخفيضه في بعض الحالات الى ٦ مليون فقط . وتدل بعض الدراسات الى إمكان تخفيضه الى رقم ادنى بحدود ١٫٥ مليون في بعض الحالات الخاصة كصورة وجه على خلفية ثابتة .

هناك طريقة اخرى للإرسال الفعال للصورة التلفزيونية هي طريقـة التحويل . يتم وفق هذه الطريقة تمثيل كل بيكسيل من صورة تلفزيونية أو من جزء منها كمجموع عناصر مختارة من نماذج قياسية . ويتم ارسال سعاتها بدقات منتقاة .

نراجـع ما استعرضناه حتى الآن . هناك ثلاثة مبادىء لترميـز الإشارات بشكل فعال :

١ ـ لا نرمز الإشارة بمعدل عينة او حرف في وقت ما ، بل نرمز ما أمكن من امتداد الإشـارة .

٢ ـ نعتبر القيود الخاصة بمصدر الإشارة .

٣ ـ ناخذ بعين الاعتبار محدودية العين والأذن في تقضي الأخطاء عند إعادة تشكيل الإشـارة .

يتضمن مرمز الأصوات هذه المبادىء بشكل جيد . لا يتم تفحص الشكل الآني لموجة الصوت بكل تفاصيلها . يرسل بدلا عن ذلك توصيف للشدات المتوسطة عبر مجال معين مرسل من التواترات ، الى جانب إشارة أخرى تبين الأحرف الصوتية ، وطبقة الصوت لها . يعد هـذا الترميز فعالا بما فيه الكفاية لأن اعضاء التصويت لا تغير اماكنها بسرعة اثناء توليد الأصوات . يولد مرمز الاصوات عند المصدر إشارة صوتية لا تشابه في تفاصيلها الإشارة الأصلية ولكنها تشبهها بشكل عام ، وذلك بسبب القصور الطبيعي لحس السمع لدينا .

يمثل مرمز الأصوات نموذجاً مثالياً لأجهزة الإرسال الفعال . يأتي بعده ربما التلفزيون الملون حيث تعرف تغيرات الالوان عبر الصورة بحدة أقل من تغير الشدات . يعتمد ذلك على قصور العين عن مشاهدة التفاصيل في الصورة الملونة .

يجبعلى فن الاتصالات المعاصر ، بعيد ذلك ، ان يستخدم وسائط تعتبر وفق نظرية الاتصالات غير فعالة بما فيه الكفاية ، ذلك لأنها لا ترمز امتدادات طويلة من الإشارة في وقت ما .

ويبقى الترميز الفعال هاماً للغاية ، ويتجسد ذلك بشكل خاص في حالة ارسال الإشارات ذات الحزم العريضة نسبياً (تلفزيون أو إشارات صوتية) عبر الدارات الباهظة التكاليف ككابلات الهاتف عبر المحيط .

لا شك أن المستقبل سيشهد طرقاً أكثر فعالية في الترميز وستتحقق نتائج باهرة ، إلاّ أن علينا الحذر في المضي بعيداً أكثر مما ينبغي .

لنتخيل مثلا أننا نرسل نصاً إنكليزياً حرفاً بحرف . إذا ارتكبنا بعض الاخطاء في إرسال عدد من الأحرف ، نستطيع رغم ذلك استرجاعها من النص :

Hore I hove reploced a few vowols by o.

يمكننا استبدال الأحرف الصوتية بحرف x والحصول على :

Hxrx x hxvx rxplxcxd thx vxwxls bx x.

اذا رمزنا النصوص اللغوية كلمة بكلمة يكون الترميز أكثر فعالية ، وإذا ارتكبنا خطأ في هذه الحالة اثناء الإرسال ، لا نكون في واقع الامر قد حصلنا على كلمة مهجاة بشكل خاطىء وكل ما في الأمر ان كلمة قد حلت محل اخرى . يمكن ان يترتب على ذلك بعض التعقيد ، مثلا استبدال جملة مثل : هطل الثلج في الشتاء ، بجملة اخرى هي : هطل الثلج في الصيف .

طبعاً يمكن ان نكتشف الخطأ بملاحظتنا ان الكلمة غير مناسبة . ولكن لنفرض اننا استخدمنا ترميزاً مغايراً لا يمكنه إلا استرجاع التراكيب الإعرابية وحسب ، عندها ستكون فرصتنا قليلة للغاية في اكتشاف اي خطأ في الإرسال .

تتصف النصوص اللغوية ومعظم مصادر المعلومات الأخرى بالغزارة ، إذ انها تقدم بدائل متعددة للمستقبل . إذا وقعت بعض الاخطاء الناجمة عن استبدال احرف باخرى ، فلا يعني ذلك ان الرسالة قد دمرت ، إذ نستطيع استنتاج الاحرف غير الصحيحة من الاحرف التي تم إرسالها بشكل صحيح . ولعله هذا هو السبب ، اي الغزارة ، في ان كلا منا يستطيع قراءة ما كتبه الآخر بيده . عندما ترسل اشارة مستمرة وفق عينات عند لحظات زمنية معينة تتسبب الأخطاء في سمات الإشارات بعض القرقعة في الصوت المرسل او بعض البقع في الصورة المبثوثة .

لقد كان هدفنا الاول حتى الآن هو إزالة هذه الغزارة ، بحيث نتمكن من إرسال اقل عدد ممكن من المؤشرات الهامة التي يمكن بواسطتها استعادة الرسالة . ولكننا نستنتج استنادا ما قدمناه ، ان النجاح الكامل في تحقيق هذا الهدف سيعرض الرسالة المبثوثة لخطر الضياع ، إذ

ان اي خطأ في الإرسال سيرتب وصول رسالة خاطئة برمتها وليست مشوهة وحسب . اما إذا فشلنا في تحقيق هدفنا المثالي بمقدار ضئيل ، فان خطأ الإرسال سيترك آثاراً كبيرة جداً على الرسالة المبثوثة دون تدميرها .

نعلم جميعاً أن هناك القليل من الضجيج في الإرسال الكهربائي ، ويتمثل بهسيس في الراديو وبقع ثلجية في التلفزيون ، وعلينا أن نضيف الى معلوماتنا ان مثل هذه الظاهرة هي من أصل الطبيعة ولا يمكن التخلص منها بشكل نهائي . هل يمكن لذلك ان يفسد خطتنا من حيث الاساس ، تلك الخطة الهادفة لترميز الرسائل التي يولدها مصدر للإشارات في عدد من الارقام الثنائية اكبر بقليل من انتروبي المصدر .

سنتناول هذا الموضوع في الفصل القادم .



الفصل الثامن

القناة ذات الضجيج

من الصعب ان يضع احدنا نفسه مكان آخر ، وعلى الاخص ان يضع نفسه مكان من عاش في ازمان غابرة . ماذا يمكن أن يكون شأن شخص من العصر الفيكتوري مع الازياء المعاصرة ، وهل كانت قوانين نيوتن في الحركة والثقالة مدهشة لمعاصريه كما كانت نظرية انيشتين مذهلة بدورها بالنسبة لمعاصري اينشتين . ما هو الشيء المحير في النسبية . ان الطلبة المعاصرين يتقبلونها دون تعليق وبشيء من الحتمية ، كما لو أن أفكارا اخرى هي الغريبة والمدهشة والتي لا يمكن تفسيرها .

إن سبب ذلك ، بشكل جزئي ، هو أن مواقفنا وليدة محيطنا وعصرنا ، ولأنه ، في حالة العلم على الاقل ، تأتي الافكار المحدثة كاستجابة لأسئلة مستجدة أو مصاغة بشكل اكثر دقة . نتذكر انه وفق افلاطون ، استطاع ار،طوا استجرار برهان هندسي من احد اتباعه ببساطة عن طريق طرح بعض الاسئلة العبقرية . لا يحتمل أن يتوصل الى إجابة مناسبة مهما كانت ، اي من الذين لم يطرحوا على انفسهم اسئلة معينة ، وعندما يصاغ السؤال من خلال الإجابة الكامنة في الدماغ ، يبدو الجواب في منتهى الوضوح .

لقد تنبه العاملون في الاتصالات منذ البداية الى حقيقة ان الدارات او الاقنية ليست كاملة . نحن تستمع في الهاتف أو الراديو الى الإشارة المطلوبة على خلفية من الضجيج ، سواء أكان عاليا أو خافتا ، والذي

يختلف من قرقعة الكهرباء الساكنة الى الهسيس المستمر ، أما في التلفزيون فتبدو الصورة متوضعة على خلفية من البقع الثلجية الخفيفة أو القوية . كذلك يختلف الحرف المستقبل عن الحرف المرسل في البث البرقي .

نفرضْ أن أحدنا قد سأل مهندساً للاتصالات عام ١٩٤٥ من ضوء للضجيج ، ولربما صاغ السؤال في الجملة التالية : ما الذي يمكن فعله ازاء الضجيج ، من المحتمل ان جواب المهندس كان سيأتي على النحو : زد من استطاعة المصدر او اجعل المستقبل اقل ضجيجا ، وتأكد من أن المستقبل سيكون اقل حساسية لتغيرات التواترات الغير متضمنة في الاشـــارة .

عندها يمكن ان يكون السائل قد عاد للالحاح : الا يمكن أن نفعل اي شيء آخر ، ولا يتوانى مهندس عام ١٩٤٥ عن الاجابة السريعة بقوله : استخدام تعديل التواترات الذي يطال حزاما اعرض ، وبذا تقلل من اثر الضجيج .

لنفرض ان الجدل قد استطرد ، وان السائل طرح السؤال التالي : يمكن ان يترتب على الضجيج ، لدى بث رسالة من لوحة أزرار ، وصول بعض الاحرف الى المستقبل بشكل خاطىء ، كيف يمكن ان نتحاشى ذلك من الممكن أن تكون اجابة مهندسنا مصاغة على النحو التالي : اعرف انني اذا استخدمت خمسة نبضات قطع او وصل لتمثيل رقم ثنائي، واصطلحت أن التركيب المكون من ثلاثة نبضات قطع ونبضتي وصل هو الذي يمثل الرقم الثنائي ، لامكنني في بعض الحالات تحديد الخطأ مثلا عندما تحتوي الاشارة المستقبلة على عدد من نبضات الوصل اقل او اكبر من اثنين .

من الممكن أن سائلنا قد تابع الموضوع الى حد أبعد بعرضه المشكلة الآتية : نفرض ان دارات لوحة الازرار تسبب الاخطاء ، هل هناك مـــن طريقة لايصال الرسالة الى هدفها . اما رد المهندس ، فكان على الارجح : أعد البث عدة مرات ، الا أن هذا مضيعة للجهد . اصلح الدارات المعطوبة

نقترب هنا شيئاً فشيئاً من الأسئلة التي لم تطرح قبل شانون . الا أننا قبل التعرض لها سنتابع سيناريو حوارنا الافتراضي بأن نعطي للسائل دور الكلام بسؤاله : افرض انني اخبرتك بخصوص ترميزي الجيد لرسالتي وانني ارسلتها عبر قناة ذات ضجيج بنسبة مهملة تماماً من الاخطاء ، وكانت نسبة اقل من أي قيمة محددة . وافرض اكثر من ذلك أنني اخبرتك أن معرفتي بنوعية وشدة الضجيج في الدارة مكنتني من حساب عدد الأحرف الممكن ارسالها عبر القناة في كل ثانية وان ارسال عدد من الأحرف عبر الدارة اقل من العدد المحسوب سيتم افتراضياً دون خطأ ، بينما اذا زاد عدد الاحرف المرسلة عن العدد المحسوب ، أصبح الوقوع في الخطأ محتملا .

يستمر السيناريو باجابة مهندس عام ١٩٤٥ : الافضل ان تريني ما تفعل . لم افكر بهذه الطريقة من قبل ، واعتقد على كل حال ان ما تقوله غير محتمل عموما ، اذ أن ازدياد الضجيج يفضي الى ازدياد الخطأ ، كما ان اعادة البث عدة مرات سيحسن الوضع في حالة عدم وجود كمية كبيرة من الاخطاء . ولكن يبقى كل هذا مكلفا للغاية هل من الممكن أن ينطوي كلامك على مغزى ما ، اذا تحقق وجود ذلك المغزى فسأصبح في حيرة من امري . يا لطريقة عرضك هذه .

ومهما ذهبنا في السيناريو ابعد من ذلك فلن نجد الا مزيداً من اخطاء المهندس الذي ضللته طريقة التناول السابقة . وما نود تثبيته هنا أن المهندسين والرياضيين الذين عاصروا الفترة الانتقالية يشتركون جميعاً بمشاعر واحدة ازاء أعمال شانون في حقل ارسال المعلومات عبر قناة ذات ضجيج . انها مشاعر الدهشة والاعجاب . الا انني أعرف رجلا غير متخصص لم يجد في تلك الاعمال ما يدهش ، فما عساني فاعل ازاء مثل هذا الموقف .

ربما ان أحسن طريقة لتناول الموضوع هي تلك التي تعرض لمشكلة القناة ذات الضجيج كما نفهمها اليوم . ومهما كان من رفع الاسئلة واجابتها ومهما بدا الحوار طبيعيا ومفروضاً ، فالقضية برمتها تنتمي

لمرحلة ما بعد شانون وان كان على القارىء ان يتعجب او لا يتعجب فهذا هو شانه وله الخيار في ذلك .

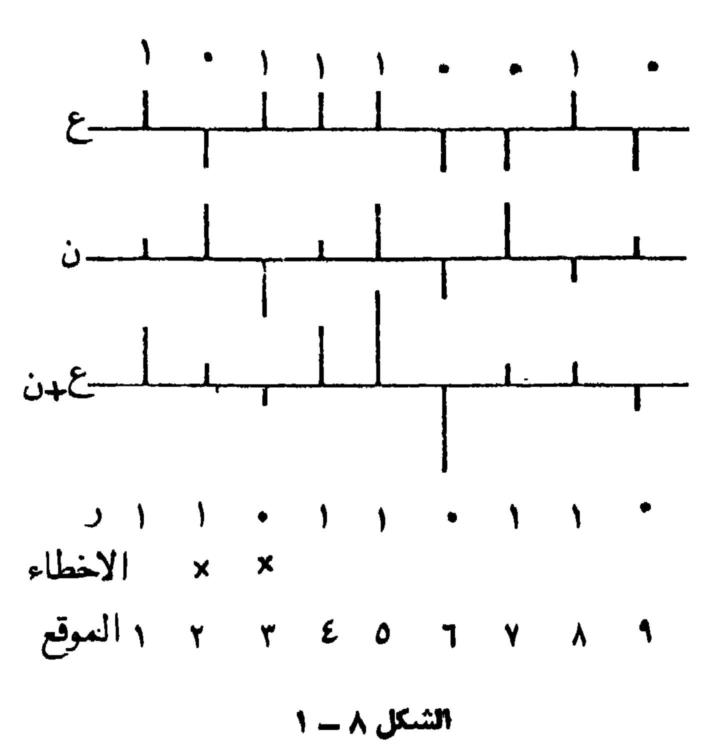
لقد قدمنا حتى الآن عرضاً للاساليب البسيطة والصعبة على حد سواء والهادفة لترميز النصوص والاعداد لتحقيق الارسال الفعال والكفؤ ورأينا كيف يمكن تمثيل اشارة كهربائية عرض حزامها س بعينات أو سعات عددها ٢ س في الثانية ماخوذة في لحظات تفصل بينها فترات زمنية بطول $\frac{١}{٢\ س}$ ثانية. كما سبق واستنتجنا ان استخدام تعديل ترميز النبضات يفضي الى توظيف حوالي ٧ ارقام ثنائية لتمثيل سعة كل عينة . وهكذا فباللجوء الى تعديل ترميز النبضات او اي منهج آخر معقد وفعال ، نستطيع بث اشارات الاصوات او الصور عبر سلسلة من الارقام الثنائية او نبضات القطع والوصل ، او النبضات الكهربائية السالبة والموجبة .

تؤكد صحة كل ما تقدم اذا استلم المستقبل نفس الاشارة التي صدرت عن المرسل ، الا ان الواقع العملي يختلف عن ذلك ، فالمستقبل قد يستلم في بعض الاحيان . اذا كانت الاشارة الصادرة ١ ، واذا كانت الاشارة الصادرة . يمكن ان ينجم ذلك عن اعطال القواطع الكهربائية في الدارات السريعة . كذلك قد يحصل الخطأ بسبب تداخل الاشارة والضجيج ، سواء اكان ضجيجا من جهاز مصنوع او من العواصف المغناطيسية .

نستطيع ان نبين من خلال حالة بسيطة كيف تحدث الاخطاء بسبب تداخل الاشارة والضجيج . لنتصور اننا نرغب بارسال عدد كبير من الارقام الثنائية . او ١ في كل ثانية عبر سلك باستخدام اشارات كهربائية يمكننا تمثيل الاشارة الناقلة لهذه الارقام بمتتالية من العينات ع كما في الشكل ٨ ــ ١ ، حيث تكون كل عينة اما + ١ او ــ ١ يتوفر لنا هنا سلسلة من الكمونات السالبة والموجبة الممثلة للارقام الثنائية .

١٠ ١١١ ٠٠ ١٠

نفرض الآن اننا اضفنا الى الاشارة كمون ضجيج عشوائي قد يكون موجباً وقد يكون سالباً . يمكننا ان نمثل ذلك ايضاً بعدد من عينات الضجيج ن المأخوذة بشكل متواقت مع العينات ع كما في الشكل ٨ ــ ١ . يعرض نفس الشكل الاشارة المركبة من الضجيج والاشـارة الاصلية ع + ن .



الشكل ٨ ــ ١

اذا فسرنا الاشارة الموجبة المستقبلة والمكونة من الاشارة الاصلية والضجيج على أنها ١ ، بينما فسرنا السالبة على انها . فان الرسالة المستقبلة الكلية ستتكون من ر رقم ثنائي حسب ما يبدو في الشكل ٨ ــ ١ وستنحصر اخطاء الارسال في المواقع : ٢ ، ٣ ، ٧ .

يتراوح تأثير الاخطاء هذه بين الازعاج وخطر قلب مفهوم الرسالة وتتجلى في حالة ارسال الاصوات او الصور وباستخدام طرق الترميز

المبسطة بقرقعة وهسيس وبقع ثلجية ، اما اذا كان ترميز التراكب هو المتبنى فيكون تاثير الاخطاء اكثر فداحة ، الا ان علينا ان نتوقع بشكل عام ان أخطر الاخطاء يقع في حالة ارسال النصوص .

يتجسد وقوع الاخطاء عند ارسال النصوص بالطرق التقليدية ، بورود احرف غير صحيحة هنا وهناك . يتميز النص بغزارته مما يسمح لنا بكشف الخطايا بالعين المجردة الا ان هذه الاخطاء تصبح باهظة التكاليف في بعض الحالات مثل طبع نسخ الصحف بشكل متواقت في اماكن متباعدة باستخدام الاشارات الكهربائية .

تصبح الاخطاء خطرة في حالة ارسال الاعداد ، مثلا ان يتبدل العدد الدال على مبلغ من المال من ١٠٠٠ الى ٩٠٠٠ ، او ان تتغير بعض المقاطع من برنامج كومبيوتر او المعلومات المغذاة اليه ، تصبح اذ ذاك كل نتائج الكومبيوتر لا معنى لها .

ذهبنا في دراستنا أبعد من ذلك عندما بينا أن زيادة الفعالية في ترميز النصوص اللغوية أو غيرها بهدف تقليل الغزارة ، سيؤدي الى زيادة الحساسية للاخطاء ، وبذا سيجري تغير عميق في معنى الاشارة المستقبلية .

واذا كانت الاخطاء بهذه الاهمية بالنسبة لنا ، فكيف لنا ان نتحاشاها تستند احدى الطرق على تكرار الارسال كأن نرسل كل حرف او كل رقم ثنائي ممثل مرتين ، وهكذا فالإرسال السلسلة الثنائية ١٠١١١٠٠١٠١ نكرر العمل مرتين ونحصل على :

مرسل ١١ ١ ٠ ٠ ١ ١ ١ ١ ٠ ٠ ٠ ٠ ١ ١ ٠ ٠ ١ .
مستقبل ١ ١ ٠ ١ ١ ١ ١ ١ ٠ ٠ ٠ ١ ١ ٠ ٠ ١ ١ ١

×
خطأ

يؤدي هذا الأسلوب الى تخفيض سرعة الارسـال حتى نصف قيمتها ، اذ يتوجب علينا على الدوام التوقف وارسال كل رقم مرة ثانية . الا اننا نستطيع أن نرى من خلال الاشارة المستقبلية الخطأ الواقع عنـد النقطة المشار اليها ، فعوضاً عن وصول اشارتين متماثلتين ٠٠ أو ١١ ، نحصل على زوج غير متماثل : ١٠ ، ولكننا لا نستطيع تحديد الاشـارة الصحيحة الصادرة ٠٠ أو ١١ لقد اكتشفنا الخطأ ولم نستطيع تصحيحه.

اذا لم تكن الاخطاء متواترة ، اي اذا كان احتمال وقوع خطأيـن عند ارسال ثلاثة ارقام متتالية مهملاً ، يمكننا كشفه وتصحيح الخطأ بارسال كل رقم ثلاث مرات ، حسب المثال التالي :

مرســل ١ ١ ١ ١ ١ ١ ٠ ٠ ٠ ٠ ٠ ٠ ١ ١ ١ ٠ ٠ ٠ ١ ١ ١
مستقبل ١ ١ ١ ١ ١ ١ ٠ ٠ ٠ ٠ ٠ ٠ ١ ٠ ١ ٠ ٠ ٠ ١ ١ ١

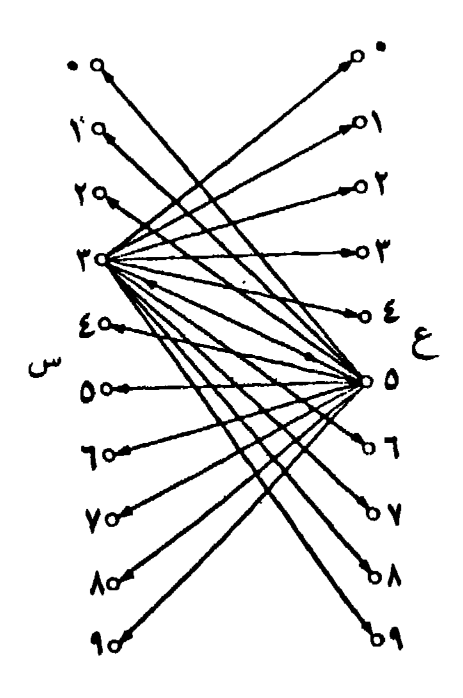
↑
خطأ

لقد خفضنا سرعة الارسال حتى الآن الى الثلث ، لأننا سنتوقف عند كل ارسال مرتين بهدف تكرار ارسال الحرف ثلاثة مرات ، الا اننا نستطيع تصحيح الخطأ استنادا لحقيقة ان الارقام في الزمرة الثلاثية ١٠١ ليست متشابهة . فاذا فرضنا أن هناك خطأ واحدا في ارسال ارقام هذه الزمرة ، لوجب أن تكون هذه الزمرة على الشكل ١١١ ، ممثلة لـ ١ وليست ٠٠٠ ممثلة لـ ٠

نجد هنا ان طريقة تكرار ارسال الارقام كفيلة بكشف وتصحيح الأخطاء القليلة الحدوث اثناء الارسال ، ولكن ما هي تكاليـف هذه الطريقة ؟ اذا استخدمناها لكشف وتصحيح الاخطاء فستنخفض سرعة الارسال الى النصف اذا كررنا الارسال مرتين الى الثلث اذا كررناه ثلاثة مرات ، كما أن هذه الطريقة تصبح عديمة الجدوى اذا كانـت الاخطاء متواترة لدرجة وقوع اكثر من خطأ واحد عند ارسال رقمين او ثلاثة .

من الواضح ان هذه الطريقة لن تقود اطلاقا الى فهم صحيح لامكانية تصحيح الأخطاء . ان ما يلزمنا في هذا المجال اداة رياضية عميقة وفعالة لقد استطاع شانون الحصول على هذه الاداة من خلال اكتشافه وبرهانه لنظريته الاساسية عن القناة ذات الضجيج . وسنتتبع فيما يلي اسلوب معالجته للموضوع .

سنعتبر حالة جملة اتصالات متقطعة حيث يتم ارسال زمرة من الأحرف او الارقام العشرية من ٠ حتى ٩ ، وذلك بهدف الحصول على نموذج مجرد وعام للضجيج والاخطاء . ولتبسيط الامر نعتبر مصدر ارسال يبث الارقام العشرية فقط ، وهذا ما يوضحه الشكل ٨ — ٢ .



الشكل ٨ — ٢

نجد على اليسار دوائر ربط بكل منها دليل رقمي ، نعتبر هذه الدوائر بمثابة مفاتيح ، وعلى اليمين يتوضع نظام مشابه ، نعتبر عناصره بمثابة اضواء . وهكذا عندما نضغط زر على اليسار يبث احد الاضواء على اليمين نوره .

اذا كان نظام ارسالنا هذا خاليا من الضجيج ، فسيؤدي ضغط المفتاح الى اضاءة الضوء . وضغط المفتاح ١ الى اضاء الضوء ١ وهكذا اما في حالة نظام ارسال غير كامل حيث يسود الضجيج فان ضغط المفتاح ٤ قد يؤدي لاشعال الضوء . مثلا او الضوء ١ او لضوء ٢ او اي ضوء آخر كما توضح الاسهم المنبعثة من المفتاح ٤ في الشكل ٨ ــ ٢ . نصطلح انه في حالة نظام الاتصال ذي الضجيج ، يكون اشعال احد الأضواء بسبب ضغط مفتاح معين هو قضية احتمالية محضة مستقلة عما جرى قبلها وانا اذا ضغطنا المفتاح ٤ فسيكون هناك احتمال مقداره ح (٦) بأن الضوء ٦ هو الذي سيضيء .

اذا لم يكن المرسل واثقا من الضوء الذي سينير عند ضغطه مفتاح معين ، فان المستقبل بدوره لن يستطيع تحديد المفتاح الذي ضغط عند مشاهدته النور من ضوء معين ، وهذا ما توضحه الاسهم المنطلقة من الضوء ٦ نحو مختلف المفاتيح على اليسار . اذا كان النور صادرا من الضوء ٦ ، فهناك احتمال مقدار ح٦ (٤) بأن يكون المفتاح ٤ هو المفتاح الذي ضغط وهكذا تتحقق في حالة نظام خال من الضجيج العلاقات :

ح٦ (٦) = ١ ، ...... ، ح٦ (٤) = ح٦ (٩) = ٠
...... الخ .

سيزيد تعقيد الشكل ٨ ــ ٢ لو رسمنا كل الاسهم الممكنة وكذا سيزداد عدد الاحتمالات المدرجة ، ولكنني أعتقد ان درجة وطبيعة الريبة لدى المستقبل عند محاولة المرسل بث حرف معين قد توضحا بما فيه الكفاية ، وكذلك درجة وطبيعة الريبة لدى المرسل عند تلقي المستقبل

لحرف معين . دعونا الآن نتناول موضوع قنـاة الاتصال ذات الضجيج بشكل اكثر شمولا . لتحقيق هذا الهدف نصطلح على استخدام الحرف س لتمثيل الاحرف المرسلة والحرف ع لتمثيل المستقبلة .

تشكل الأحرف س المجموعة المولدة عن مصدر الارسال . إذا كان عدد هذه الاحرف هو م وكان احتمال ورود كل منها مستقلا عما سواه ومساويا لـ ح (س) ، تكون سرعة توليد المصدر للمعلومات أي الانتروبي الخاصة به كما تعلمنا سابقاً .

$$\text{ت}(\text{س}) = -\sum_{\text{ع}=1}^{\text{م}} \text{ح}(\text{ع}) \times \text{لع}\ \text{ح}(\text{ع})$$

نعتبر خرج الجهاز ، والذي نصطلح عليه بالحرف ع ، على أنه مصدر رسائل آخر . لا يساوي عدد الأضواء عدد المفاتيح بصورة عامة ، إلا أننا سنفترض ذلك ، وهكذا سيكون هناك م ضوء ، وبذا تساوي انتروبي الخرج :

$$\text{ت}(\text{ع}) = -\sum_{\text{ع}=1}^{\text{م}} \text{ح}(\text{ع}) \times \text{لع}\ \text{ح}(\text{ع})$$

لنلاحظ انه بينما يعتمد ح (س) على دخل قنـاة الاتصال فقـط ، يتوقف ح (ع) على نفس الدخل وعلى اخطاء الإرسال إضافة لذلك ، وهكذا فاحتمال انارة الضوء ٤ في حالة قصر الإرسال على ضغط المفتاح ٤ فقط يختلف عن احتمال إنارة الضوء ٤ في حال ضغط المفاتيح بشكل عشوائي .

اذا افترضنا أن بامكاننا مراقبة المرسل والمستقبل معاً ، لاستطعنا اكتشاف تواتر تركيب معين من س ، ع ، مثلا كم مرة ادى ارسال ٤ الى استقبال ٦ ، أو إذا عرفنا الخصائص الاحصائية للمصدر والمستقبل لتمكنا من حساب هذه الاحتمالات ومنها نستطيع حساب انتروبي اخرى :

$$\text{ت}(\text{س}،\text{ع}) = \sum_{\text{س}=1}^{\text{م}} \sum_{\text{ع}=1}^{\text{م}} -\text{ح}(\text{س}،\text{ع}) \times \text{لو ح}(\text{س}،\text{ع})$$

وهي تمثل الريبة في اقتران زوج معين س ، ع .

نذهب الآن أبعد من ذلك ؛ فنفرض اننا نعرف س ، اي اننا نعرف اي المفاتيح تم ضغطه ، ما هو احتمال اضاءة مختلف الاضواء في هذه الحالة ، كما يتوضح بالاسهم على يمين الشكل ٨ ــ ٢ . يقود ذلك الى الانتروبي التالية :

$$\text{ت}_{\text{س}}(\text{ع}) = \sum_{\text{س}=1}^{\text{م}} \sum_{\text{ع}=1}^{\text{م}} -\text{ح}(\text{س}) \times \text{ح}_{\text{س}}(\text{ع}) \times \text{لو ح}_{\text{س}}(\text{ع})$$

وهي انتروبي شرطية للريبة ، ويذكر شكلها بانتروبي الآلة المتناهية الحالات ، وكما في تلك الآلة ، نضرب الريبة لحالة معينة (الحالة هنا قيمة س) باحتمال ان تلك الآلة ستحقق ثم نجمع عبر كل الحالات الممكنة.

نفرض اخيرا اننا نعرف اي الاضواء سيشع . نستطيع تحديد احتمالات ضغط مختلف المفاتيح ، وهذا بدوره يقود الى انتروبي شرطية اخرى :

$$\text{ت}_{\text{ع}}(\text{س}) = \sum_{\text{ع}=1}^{\text{م}} \sum_{\text{س}=1}^{\text{م}} -\text{ح}(\text{ع}) \times \text{ح}_{\text{ع}}(\text{س}) \times \text{لو ح}_{\text{ع}}(\text{س})$$

وهي عبارة عن المجموع لكل قيم ع لاحتمال استقبال ع مضروبا في الريبة المقابلة لاحتمال ضغط المفتاح س عند تلقي الضوء ع .

تعتمد كل حسابات الانتروبي هي على الخصائص الاحصائية للمصدر لانها تتوقف على تواتر ارسال أو تواتر استقبال ع ، كذلك على اخطا الارسال .

ان افضل تفسير لكميات الانتروبي المحسوبة اعلاه هــو ذلك الــذي يعتبرها ممثلة للريبة المرتبطة بتوليد الاحرف عند المصدر وتلقيها عنــد المستقبل ، وهكذا نثبت ما يلي :

ت (س) : الريبة بالنسبة لـ س ، بمعنــى اي الاحرف ســيتم ارساله .

ت (ع) : الريبة المتعلقة بالحرف الذي سيتم استقباله في حالــة اعتبار مصدر رسائل معين وقناة ارسال محددة .

ت (س ، ع) الريبة في حالة ارسال س ، واستقبال ع .

$\text{ت}_{\text{س}}$(ع) الريبة في استقبال ع عند ارسال س ، وهي متوسط الريبة بالنسبة للمرسل فيما يتعلق بالحرف الذي سيتم استقباله .

$\text{ت}_{\text{ع}}$(س) الريبة في ارسال س عند استقبال ع ، وهي متوسط الريبة بالنسبة للمستقبل فيما يتعلق بالحرف الذي ارسل .

ترتبط هذه الكميات فيما بينها ببعض العلاقات :

$$\text{ت}(\text{س}\ ،\ \text{ع}) = \text{ت}(\text{س}) + \text{ت}_{\text{س}}(\text{ع})$$

اي ان الريبة في حالة ارسال س واستقبال ع تساوي مجموع الريبة في س والريبة في استقبال ع عند ارسال س .

$$\text{ت}(\text{س}\ ،\ \text{ع}) = \text{ت}(\text{ع}) + \text{ت}_{\text{ع}}(\text{س})$$

اي ان الريبة في حالة ارسال واستقبال ع تساوي مجموع الريبة في ع والريبة في ارسال س عند استقبال ع .

نلاحظ انه اذا ساوت $ت_{س}(ع)$ للصفر فان $ت_{ع}(س)$ ستساوي الصفر في نفس الوقت واذ ذاك تتساوى $ت(س)$ مع $ت(ع)$، وهذه هي حالة القناة بدون ضجيج حيث تتساوى انتروبي الاشارة الصادرة مع انتروبي الاشارة المستقبلية، ويعرف المرسل اي الاحرف سيصل، وكذا المستقبل يعرف اي الاحرف أرسل .

تبدو الريبة $ت_{ع}(س)$ اي الريبة في الحرف المرسل عند استقبال حرف معين، كمقياس طبيعي للمعلومات المفقودة عبر الارسال . هذا هو الواقع فعلاً، لذا أعطيت هذه الانتروبي تسمية خاصة : الالتباس في قناة الاتصال . اذا اعتبرنا كل من $ت(س)$، $ت_{ع}(س)$ كانتروبي مقدرة بالبيت في الثانية، يمكننا ان نبرهن أن سرعة ارسال المعلومات عبر القناة هي :

$$سر = ت(س) - ت_{ع}(س)$$

وهكذا تساوي هذه السرعة سرعة بث المعلومات من المصدر مطروحاً منها الالتباس في القناة، اي انتروبي المصدر مطروحاً منها ريبة المستقبل فيما يتعلق بالحرف المرسل .

تساوي هذه السرعة أيضاً :

$$سر = ت(ع) - ت_{س}(ع)$$

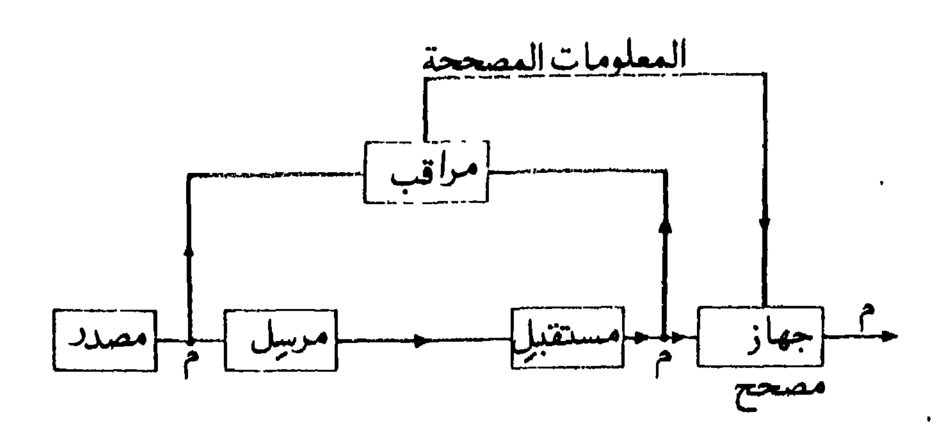
بكلمة اوضح، حاصل طرح ريبة المرسل فيما يتعلق بالحرف الواصل من انتروبي المستقبل .

واخيراً تعطى هذه السرعة بالعلاقة :

$$سر = ت(س) + ت(ع) - ت(س، ع)$$

اي مجموع انتروبي المصدر وانتروبي المستقبل مطروحاً منه الريبة في ارسال س واستقبال ع . نلاحظ انه من اجل قناة خالية من الضجيج يكون ح (س ، ع) مساوياً للصفر الا في حالة س = ع وبالتالي :
ت (س ، ع) = ت (س) = (ع) ، وتكون سرعة ارسال المعلومات هي نفسها انتروبي المصدر ت (س) .

يوضح شانون معنى هذه السرعة بالشكل ٨ ــ ٣ . نفرض هنا مراقباً يلاحظ الاشارة المرسلة والمستقبلية ويقارن بينها ثم يرسل التصحيح المطلوب للاشارة المستقبلة . يبرهن شانون ان تصحيح الاشارة يستلزم تساوي انتروبي الاشارة المصححة مع الالتباس في القناة .



الشكل ٨ ــ ٣

نلاحظ ان سرعة ارسال المعلومات (سر) تعتمد على القناة وعلى المصدر . كيف نستطيع توصيف السعة الخاصة بارسال المعلومات في حالة قناة غير كاملة او ذات ضجيج . نستطيع اختيار المصدر بحيث تكون السرعة سر اكبر ما يمكن لقناة ارسال معينة . تدعى هذه القيمة العظمى بسعة القناة ، ونرمز لها برمز مناسب هو س .

تتضمن نظرية شانون للقناة ذات الضجيج السعة س ، وتنص على :
نفرض مصدراً متقطعاً ذي انتروبي ت وقناة ارسال متقطع سعتها س .
اذا كانت ت < س ، نستطيع ايجاد نظام ترميز يحيث يمكن ارسال خرج المصدر عبر القناة بتواتر صغير جداً من الاخطاء اي بالالتباس صغير ؛ اما اذا كانت ت > س فيمكن عندها ترميز المصدر بحيث يكون التباس القناة اقل ت – س + ل ، حيث ل عدد صغير جداً . لا توجد اي طريقة للترميز يمكنها جعل التباس القناة اقل من ت – س .

هذه هي الصيغة التي ادهشت الرياضيين والمهندسين . كلما ازدادت احتمالات الاخطاء في الارسال ، اي كلما تواترات الاخطاء ، انخفضت ، وفق شانون ، سعة القناة بشكل مطرد . مثلاً اذا اعتبرنا نظاماً مرسلاً للارقام الثنائية وكان بعضها خاطئاً ، فان سعة القناة س ، اي عدد واحدات البيت من المعلومات المقابلة لكل رقم ثنائي مرسل ، سيتناقص . الا ان سعة القناة تتناقص كلما تواترت الاخطاء في بث الارقام ، وهكذا فلكي نبقى في حدود اقل ما يمكن من الاخطاء علينا انقاص سرعة الارسال بحيث تكون مساوية لسعة القناة او اقل من تلك السعة .

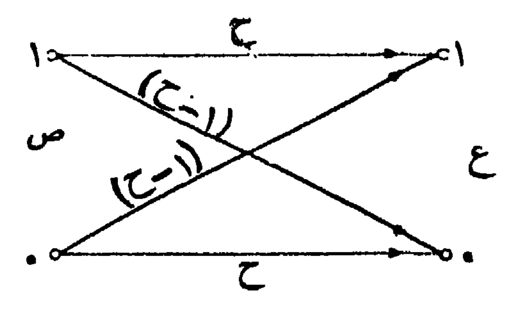
كيف نستطيع تحقيق هذه النتيجة ؟ نستذكر أن الترميز الفعال لمصدر معلوماتي يستلزم دمج عدد كبير من الاحرف مع بعضها وترميز الرسالة كمجموعة من التراكيب الطويلة . ينطبق هذا على الاستخدام الفعال للقناة ذات الضجيج ، اذ يجب أن نتعامل مع تراكيب طويلة من الاحرف المستقبلة ؛ بحيث يتالف كل تركيب من اكبر عدد ممكن من الاحرف . وما سيحدث ، هو انه من بين كل التراكيب الممكنة ، سيقتصر الارسال والاستقبال على التراكيب التي يمكن أن ترد باحتمال غير مساوٍ للصفر .

يبحث شانون ، بهدف برهان نظريته المدرجة اعلاه ، عن القيمة الوسطية لتواتر الخطأ لكل اساليب الترميز الممكنة ، اي لكل الارتباطات الممكنة بين تراكيب دخل وتراكيب خرج معينة ، وذلك عندما يتم انتقاء

الرموز بشكل عشوائي ، ثم يمضي شانون ليثبت أنه عندما تكون سعة القناة اكبر من انتروبي المصدر فان وسطي سرعة الخطا مقدراً من اجل كل اساليب الترميز هذه يقترب من الصفر كلما ازداد طول التركيب . اذا استطعنا الحصول على هذه النتيجة الجيدة بعملية توسيط على كل طرق الترميز منتقاة بشكل عشوائي ، فلابد أن واحدة من طرق الترميز هذه تفضي الى هذه النتيجة الجيدة . لقد وصف احد نظريي المعلومات طريقة البرهان هذه بكونها في منتهى الغرابة ، ولعلها كذلك لانها لن تخطر على بال رياضي غير موهوب ، وربما أن الموضوع برمته ما كان ليخطر على بال رياضي غير موهوب أيضاً .

ان المعالجة السابقة لها صفة العمومية ، لذا فهي تنطبق على كل المسائل الا انني اعتقد ان العودة الى مثال القناة الثنائية ذات الاخطاء سيلقي مزيداً من الاضواء على الموضوع ، وقد سبق أن بحثنا هذه القناة في الفصل الحالي واوضحها الشكل ٨ — ١ . لنر ما يمكن أن تقوله نظرية شانون عن هذا المثال البسيط والشائع .

نفرض ان احتمال ارسال الـ ٠ عبر القناة واستقباله ٠ أيضاً هو ح ، وهو نفس احتمال ارسال الـ ١ عبر القناة واستقباله ١ . ، وهكذا يكون احتمال استقبال الـ ١ بدلاً من الـ ٠ المرسل واستقبال الـ ٠ بدلاً من الـ ١ المرسل هو : (١ — ح) . نفرض أكثر من ذلك أن كل هذه الاحتمالات لا تتوقف على الماضي ولاتتغير مع الوقت . يعطي الشكل ٨ — ٤ التمثيل المجرد لهذه القناة كقناة ثنائية متناظرة (بنفس أسلوب الشكل ٨ — ٢) ؛ وقد غيرنا رمز الحرف المرسل الى ص .



الشكل ٨ — ٤

تتحقق السرعة العظمى لارسال المعلومات عبر هذه القناة ، اي نصل الى سعتها ، اذا توفر مصدر ارسال يولد الرمز ١ بنفس احتمال توليد الرمز ٠ ، وذلك بسبب تناظر هذه القناة . وهكذا ففي حالة ص (وايضاً في حالة ع بسبب التناظر) :   ح (١) = ح (٠) = ½
ووفق ما تقدم :

ت (ص) = ت (ع) = − (½ لع ½ + ½ لع ½)
= ١ بيت لكل رمز

ماذا عن الاحتمالات الشرطيـة والالتباس في القنـاة ؟ ستسهم في الانتروبي الشرطية اربعة حدود . المصادر والمساهمات هي :

احتمال استقبال الـ ١ هو ½ . عندما يتم تلقي الـ ١ ، يكـون احتمال أن الـ ١ هو المرسل مساوياً لـ ح ، واحتمال أن الـ ٠ هـو المرسل مساوياً لـ (١ − ح) . ان مساهمة هذه الاحداث في الالتباس هي:

½ [− ح لع ح − (١ − ح) لع (١ − ح)]

اذا أعدنا هذه المناقشة من اجل احتمال استقبال الـ ٠ ، نحصل على مساهمة في الالتباس مساوية للمساهمة الاخيرة .

وهكذا فمن اجل القناة الثنائية التناظرة ، يساوي الالتباس مجموع هذه الحدود :   تع (ص) = − ح لع ح − (١ − ح) لع (١ − ح)
وتكون السعة :   س = ١ + ح لع ح + (١ − ح) لع (١ − ح) .

لنلاحظ أن هذه السعة تساوي الواحد مطروحاً منه التابع الموقع في الشكل ٥ − ١ . اذا كان ح = ½ ، كانت س = ٠ ، وهذا طبيعي لاننا اذا استقبلنا ١ في هذه الحالة ، يتساوى احتمال أن يكون الرقم المرسل ١ مع احتمال أن يكون الرقم المرسل ٠ ، وهكـذا لا تساهم الرسالـة المستقبلة في حل الريبة المتعلقة بالرقم المرسل . كما يبدو من العلاقـة

الاخيرة أن قيمة السعة هي نفسها من اجل ح = ٠ ، ح = ١ . اذ أن الاستقبال الدائم ل . في حالة ارسال الـ ١ ، والاستقبال الدائم ل ١ في حالة ارسال الـ . سيجعل وثوقيتنا من المرسل في هذه الحالة مطابقة لوثوقيتنا به عندما نستقبل وبشكل مستمر الـ ١ لدى ارسال ١ والـ . لدى ارسال . .

اذا كانت القيمة الوسطية للخطأ مساوية لرقم واحد من أصل كل عشرة ، انخفضت سعة القناة الى ٥٣ ٪ من قيمتها في حالة الارسال العاري عن الخطأ ، أما اذا كانت القيمة الوسطية ١ ٪ ، انخفضت السعة الى ٩٢ ٪ .

يعترف الكاتب عند هذه المرحلة أن بساطة النتيجة التي حصلنا عليها في حالة القناة الثنائية المتناظرة لها دور مضلل بالفعل ، فقد كانت مضللة بالنسبة للكاتب على الاقل . فاذا اعتبرنا قناة ثنائية غير متناظرة حيث احتمال استقبال الـ ١ في حالة ارساله هو ح بينما احتمال استقبال الـ . في حالة ارساله هو احتمال مغاير ط ، وحاولنا حساب السرعة المثلى عبر القناة ، اي سعة القناة ، لوقعنا في ورطة فعلاً . أما الاقنية الاكثر تعقيداً فتطرح مسائل قد تكون مستحيلة الحل .

هذا هو السبب في الاهتمام الكبير الذي أولي للاقنية الثنائية المتناظرة ، اضافة لاهميتها العملية . ماهو نوع الترميز الذي علينا تبينه كي نحقق ارسالاً عديم الاخطاء عبر هذه القناة . ذكر شانون في بحثه الاول الامثلة التي طرحها ر. و. هامينغ . نشر مارسيل ج. اي. جولاي عام ١٩٤٩ طرق الترميز المصححة للاخطاء ، بينما نشر هامينغ بحثه عام ١٩٥٠ . يجب أن نذكر أن هذه الامثلة قد صممت بعيد عمل شانون . ويمكن أن تكون قد خطرت لاصحابها قبل ذلك ، الا أن بحث شانون في الارسال العاري عن الاخطاء ، شجع العلماء على طرح التساؤل التالي : كيف لنا أن نحقق ذلك .

رأينا ان تحقيق التصحيح الفعال للاخطاء يتم اذا اعتبر الرمز سلاسل أطول من أرقام الرسالة . نفرض على سبيل المثال اننا نرمز ارقام رسالتنا في تراكيب مكونة من ١٦ رقم ونضع بعد كل تركيب أرقام ضابطة تمكن من اكتشاف خطأ وحيد سواء اكان في أرقام الرسالة او في الارقام الضابطة . نعتبر كمثال خاص الرسالة المكونة من سلسلة الارقام : ٠ ٠ ٠ ١ ١ ٠ ١ ٠ ١١٠ ٠ ١ ٠ ١١ . لايجاد الارقام الضابطة المناسبة نكتب هذه السلسلة في الجدول الموضح في الشكل ٨ ــ ٥ .

	(٠)	(٠)	(١)	(١)
(١)	١	١	٠	١
(٠)	٠	٠	١	١
(٠)	٠	١	٠	١
(١)	١	٠	٠	٠

الشكل ٨ ــ ٥

نربط بكل سطر او عمود من الجدول دائرة ، ثم نضع في داخل الدائرة . أو ١ بحيث يصبح عدد مرات ورود الـ ١ في السطر المعتبر او العمود زوجياً . نطلق على هذه الارقام اسم الارقام الضابطة . اذا عددنا عدد مرات ورود الـ ١ في كل سطر وكل عمود من مثالنا هذا بعد اضافة الارقام الضابطة ، نحصل على النتائج التالية :

الاعمدة معتبرة من اليمين الى اليسار : ٤ ، ٢ ، ٢ ، ٢

الاسطر معتبرة من الاسفل الى الاعلى : ٢ ، ٢ ، ٢ ، ٤

ماذا يحدث لو ارسل احد الارقام خطأ من اصل الرسالة المكونة من ١٦ رقم . سيصبح عدد مرات ورود الـ ١ فرديا في احد الاسطر واحد الاعمدة ، وهذا يدفعنا لتبديل الرقم في الموقع حيث يتقاطع السطر والعمود المعنيين .

وماذا يحدث لو ان خطأ وقع في احد الارقام الضابطة . سيصبح عدد مرات ورود الـ ١ فرديا في احد الاعمدة . لقد اكتشفنا خطأ في هذه الحالة، الا انه لم يكن بين ارقام الرسالة .

ان مجموع الارقام المرسلة لرسالة مكونة من ١٦ رقم هو ١٦ + ٨ = ٢٤ رقم ، وهكذا زاد عدد الارقام المرسلة بنسبة $\frac{٢٤}{١٦}$ = ٥ر١ لو بدانا برسالة مكونة من ٤٠٠ رقم لاحتجنا الى ٤٠ رقم ضابط ولكانت نسبة الزيادة في هذه الحالة : $\frac{٤٤٠}{٤٠٠}$ = ١ر١٠ ولكان بامكاننا تصحيح خطأ من اصل ٤٤٠ رقم بدلا من تصحيح خطأ من اصل ٢٤ رقم .

نستطيع تصميم اساليب ترميز اخرى بهدف تصحيح عدد اكبر من الاخطاء في تركيب من الاحرف المرسلة . طبعا اذا اردنا تصحيح عدد اكبر من الاخطاء لاحتجنا بالمقابل لعدد اكبر من الارقام الضابطة . نعتبر ترميزاً اخيراً ، مهما كانت طريقة تصميمه ، يفضي الى تراكيب عددها $٢^{م}$ يتكون كل منها من م رقم ثنائي ، وهي تمثل كل التراكيب الممكنة في هذه الحالة والتي نرغب ايضاً بارسالها . سنحتاج في واقع الامر الى عدد اكبر من الارقام الثنائية في كل تركيب لتغطية الحاجة من الارقام الضابطة .

عندما نستقبل تراكيباً معينا من الأرقام ، يجب أن يكون بمقدورنا ان نستنتج منه اي التراكيب هو الذي ارسل فعلاً ، على الرغم من وقوع بعض الأخطاء فيه والبالغة ن خطأ (استبدال عدد من حالات ورود الـ ١

ب . ، والعكس)) . يقول الرياضي أن ذلك ممكن اذا كان البعد بين تركيبين متتاليين يحتوي على الاقل على عدد من الأرقام الثنائية مساو لـ (٢ ن + ١) .

لقد استخدم هنا مصطلح البعد بشكل غريب فعلاً ، بهدف تحقيق الغايات التي يسعى الرياضي اليها . نعني بالبعد هنا عدد الارقام الثنائية في التركيب الأول التي يجب استبدالها كي نحصل على التركيب الثاني . مثلاً البعد بين ١٠٠١٠٠ و ١٠١١١١ هو ٣ ذلك لأننا نحصل على أي من التركيبين باستبدال ٣ ارقام ثنائية في التركيب الآخر .

عندما نرتكب عدداً من الاخطاء في الإرسال مقدارها ن ، يكون البعد بين التركيب الذي نستقبله وذاك الذي ارسل مساوياً لـ ن ، وقد يكون التركيب المستقبل اقرب بـ ن رقم من تركيب آخر . إذا اردنا أن نتأكد من كون التركيب المستقبل أقرب على الدوام من التراكيب المرسل منه الى اي تراكيب آخر ، لوجب أن يكون البعد الأصغري بين أي تركيبين من نظام الترميز (٢ ن + ١) .

تطرح اذن مسألة الترميز وفق تراكيب على النحو التالي : كيف يمكن أن نجد مجموعة من التراكيب عددها ٢ ^م تركيب ، يحتوي كل منها على نفس العدد من الأرقام الثنائية ، وهو عدد يجب أن يكون أكبر من م ، بحيث يكون البعد الأصغري بين كل تركيبين مساوياً لـ (٢ ن + ١) . يجب أن يتحقق اضافة لذلك كون التراكيب ذات طول اصغري .

برهنت طريقتا هامينغ وجولاي انهما فعالتان ، كما أبدعت طرق ترميز فعالة اخرى .

نشير هنا الى مشكلة اخرى في ترميز التراكيب ، هي وجوب كون الطريقة المعتمدة عملية الطابع خاصة فيما يتعلق بحل الرموز . ان مجرد إدراج الرموز المتبناة لا يكفي ، فقد تكون اللائحة طويلة جداً . إن استخدام ٢٠ رقم ثنائي للترميز (م = ٢٠) سينجم عنه جدول يحتوي

بحدود مليون تراكيب مختلف من الرموز. يعني هذا ان اكتشاف التركيب الاقرب للتركيب المستقبل سيستغرق وقتاً طويلاً .

تزودنا النظرية الجبرية للترميز بوسائل ناجعة للترميز وحل الرموز وتصحيح العديد من الاخطاء . كان سليبيان هو السباق في هذا المجال ، ويمكننا ادراج عدد من أسماء المساهمين وفق الطرائق التي ابتدعوها : رموز ريد ــ سولومون ، وايضاً رموز بوز ــ شودهوري . اما الوين برليكامب فقد قدم أساليب رياضية جيدة لحساب التراكيب الأقرب للتركيب المستقبل .

تقدم طريقة الترميز الالتفافية واسطة أخرى لتصحيح الاخطاء ، نعتبر وفق هذه الطريقة الجزء الاخير من التركيب الثنائي الذي سيرسل والمكون من م رقم ثنائي ونحفظه في خزان معلومات إضافي . كلما تمت تغذية رقم ثنائي جديد ، يرسل المرمز ٢ أو ٣ أو ٤ أرقام ثنائية ، وهذه الارقام المرسلة تنتج عن جمع الارقام الثنائية في خزان المعلومات الاضافي ولكن بدون حمل من خانة لأخرى .

تعود هذه الطريقة أصلاً الى الياس ، إلاّ أن البحث الأول الذي نشر حول موضوع الترميز وحل الرموز أتى عام ١٩٥٨ من خلال تسجيل براءة اختراع لِ د. و. هاجيلبارجر . اما الاستخدام الأول للطريقة فقد بدأ عام ١٩٦٧ على يد اندريه. ج. فيتربي الذي اخترع طريقة مثلى وبسيطة لحل الرموز دعيت باسم حل الرموز بأعظم احتمال ممكن .

تستخدم هذه الطريقة اليوم في الأقنية ذات الضجيج الهامة كإرسال الصور من مركبة فويجير عن المشتري وأتباعه . إن اهمية الطريقة تتجسد باستخدامها شدة واشارة النبضة المستقبلة .

اذا استقبلنا نبضة موجبة صغيرة فكأنما استقبلنا نبضة سالبة مع ضجيج ولا يعقل أن تكون نبضة موجبة مع ضجيج . اما اذا استقبلنا نبضة موجبة كبيرة فالأرجح أنها نبضة موجبة مع ضجيج وليست نبضة سالبة مع ضجيج . تستخدم الطريقة المشار اليها هذه الملاحظات .

يستخدم الترميز في تراكيب بهدف حماية المعلومات ذات الأهمية المخزنة في الكومبيوتر . ويستخدم أيضاً في إرسال المعلومات عبر الأقنية ذات الضجيج المخفض .

تتعرض معظم الدارات المستخدمة لنقل المعلومات الى اندفاعات طويلة من الضجيج . عندما يحدث ذلك ، تكون الطريقة المثلى في تصحيح الخطأ هي تقسيم الرسالة الى تراكيب من الأرقام واستخدام طريقة بسيطة لاكتشاف الخطأ . اذا اكتشف الخطأ في التركيب المستقبل ، يصبح عندها من المفضل إعادة إرسال التركيب .

يجد الرياضيون في طريقة الترميز بالتراكيب متعة وتحدياً في وقت واحد. لذا أصبحت نظرية المعلومات وفق بعضهم نظرية جبرية للترميز. ان نظرية الترميز غاية في الاهمية لنظرية المعلومات . لقد كانت نظرية المعلومات في بدايتها ، أي عند طرح عمل شانون ، أكثر شمولاً . يجب أن نعتبر ترميز المصدر وكذلك ترميز القناة في إطار موضوع الترميز .

بحثنا في الفصل السابع طرق التخلص من الغزارة بحيث يمكن بث الرسالة بعدد أقل من الأرقام . اما في هذا الفصل فقد رأينا كيفية اضافة سمة الغزارة الى رسالة تفتقر اليها بهدف تحقيق ارسال افتراضي خال من الأخطاء عبر قناة ذات ضجيج . لقد اذهلت الرياضيين والمهندسين فكرة أن مثل هذا التحقيق ممكن ، اما شانون فقد برهن الفكرة واثبت انها قابلة التحقيق فعلاً .

سيكون المستقبل في ريبة ، قبل استلامه الرسالة المبثوثة عبر قناة خالية من الاخطاء ، عن الرسالة المعينة من مجموعة الرسائل الممكنة التي سيقوم المصدر بإرسالها فعلاً . ان قيمة هذه الريبة هي سرعة اصدار المعلومات من المصدر او الانتروبي الخاصة به مقاسة بالبيت لكل رمز ولكل ثانية . ستحل ريبة المستقبل هذه تماماً إذا تلقى نسخة مطابقة للرسالة التي بثت .

يمكن بث الرسالة بنبضات كهربائية سالبة وموجبة . إذا اضيف الى الرسالة ضجيج مؤلف من نبضات عشوائية سالبة وموجبة ، فيمكن أن تنقلب النبضات الموجبة سالبة والسالبة موجبة . إذا استخدمت مثل هذه القناة للبث فعلاً فسيكون هنا ريبة ما فيما يتعلق بالإشارة التي سيتلقاها المستقبل عند ارسال المصدر اشارة معينة .

عندما يتلقى المستقبل رسالة معينة عبر قناة ذات ضجيج ، فسيكون بالطبع على علم اكيد بما وصله ، إلاّ أنه لن يستطيع التاكد بشكل كامل عن الرسالة التي صدرت فعلاً من الجانب الآخر ، اي المرسل . وهكذا فلن تحل الريبة عنده حتى لدى وصول الرسالة اليه . تعتمد الريبة المتبقية على احتمال أن تكون الاشارة المستقبلة مخالفة للإشارة الصادرة .

إن ريبة المستقبل حول الرسالة الفعلية ، هي من وجهة نظر المرسل مجموع انتروبي او ريبة مصدر الرسائل وريبة المستقبل حول الرسالة الصادرة عند علمه الاكيد بالرسالة المستقبلة . يستخدم شانون كمعيار لهذه الريبة الاخيرة ما يسميه الالتباس في القناة ، ويعرف سرعة ارسال المعلومات كحاصل طرح هذا الالتباس من انتروبي الرسالة .

تعتمد سرعة إرسال المعلومات على كمية الضجيج او الريبة في القناة ، وعلى طبيعة المصدر المرسل . نفترض اننا اخترنا مصدر للإرسال يؤمن لنا قيمة عظمى بسرعة الإرسال ، نصطلح في هذه الحالة على تسمية القيمة العظمى المحققة بسعة القناة ذات الضجيج ونقيسها بالبيت لكل رمز او البيت لكل ثانية .

ان مفهوم سعة القناة حتى الآن قد انحصر في كونه كمية رياضية معرفة يمكن حسابها إذا عرفنا احتمالات الانواع المختلفة للأخطاء والممكنة في بث الرسائل . إلاّ أن هذا المفهوم ، اي مفهوم سعة القناة ، هو مفهوم هام للغاية ، لأن شانون يبرهن ، من خلال نظريته الأساسية عن الاقنية ذات الضجيج ، انه إذا كانت انتروبي المصدر اقل من سعة القناة ، فيمكن ترميز الرسائل التي يولدها المصدر بحيث يمكن بثها عبر القناة ذات الضجيج بخطأ صغير لا يتجاوز حداً معرفاً بشكل مسبق .

ان تحقيق بث الرسائل بدون اخطاء عبر اقنية ذات ضجيج ، يتطلب تجميع سلاسل كبيرة من الرموز ومزجها في رموز أكبر . هذا هو بالضبط ترميز التراكيب الذي واجهناه سابقاً ، إلاّ اننا نرجع اليه لهدف آخر . فهنا لا نستخدمه للتخلص من غزارة الرسائل التي يسببها المصدر ، بل على العكس للزيادة في الغزارة بحيث نتمكن من بث الرسائل عبر الأقنية ذات الضجيج وبدون خطأ . ان جوهر مشكلة الاتصالات الفعالة والخالية من الأخطاء هو في واقع الأمر ، كيفية تخليص الرسائل من الغزارة غير الفعالة الموجودة فيها واضافة عوضاً عنها غزارة من نوع ملائم تمكن من اكتشاف وتصحيح اخطاء الإرسال .

ان الأرقام المضافة لهذه الغاية ستبطىء من سرعة الارسال . لقد رأينا أن استخدام قناة ثنائية متناظرة يصل الى المستقبل عبرها رقم واحد غير صحيح من اصل ١٠٠ رقم مرسل ، يقيد نسبة بث الرسائل عبرها بقيمة ٩١٢٪ . يعني ذلك وسطياً ، أن اعتبارنا لرسالة مؤلفة من ٩٢ رقم وخالية من الغزارة ، يفرض علينا أن نضمنها ٨ ارقام إضافية ضابطة جاعلين بذلك مجمل دفق الأرقام غزيراً .

يلعب عمل شانون بالنسبة الينا دور المرشد ، إلاّ أن الصعوبات الرياضية التي تواجهنا عند التعامل مع الاقنية المعقدة هي صعوبات جمة للغاية ، وحتى في حالة القناة الثنائية البسيطة المتناظرة والتي تعتمد القطع والوصل ، فإن مشكلة البحث عن الترميز الفعال هي مشكلة كبيرة جداً ، هذا على الرغم من أن الرياضيين قد ابدعوا عدداً كبيرا من طرق الترميز الممتازة ، ولكن يا للأسف تبقى هذه الطرق بدورها صعبة التطبيق العملي .

هل يعني ذلك أننا نقدم صورة مشجعة ؟ كم نحن اليوم اكثر حكمة بالمقارنة مع الفترة السابقة لنظرية المعلومات ، اذ اننا نعرف ما هي المشكلة، ونعرف من حيث المبدأ ما الذي يجب علينا عمله، وقد ادهشت النتائج المهندسين والرياضيين . وأكثر من ذلك فبحوزتنا طرائق فعالة للترميز ومصححة للأخطاء في نفس الوقت يمكن تطبيقها في مجالات متعددة أهمها بث صورة الكواكب الى الأرض من مركبات الفضاء البعيدة .



الفصل التاسع

عدة أبعاد

عثرت منذ سنين بعيدة (حوالي ثلاثين سنة) في مكتبة سانت بول العامة على كتاب أطلعني على غوامض البعد الرابع . كان عنوان الكتاب الأرض المسطحة لمؤلفه آبوت ، وقد تناول بالوصف عالما ذي بعدين عديم السماكة . يمكن رسم هذا العالم وكل كائناته بكل تفاصيلها على صفحة من الورق .

لا ازال أتذكر بعجب حتى الآن خصائص المجتمع في الأرض المسطحة، فالكائنات هناك مضلعة ، وعدد الأضلاع يشير الى الوضع الاجتماعي . تمنح اكثر الكائنات رفعة مــن بــين الكائنات المتعددة الأضلاع مرتبة الدائرة . اما أقل الكائنات أهمية فهي المثلثات المتساوية الساقين ، اما المتساوية الأضلاع فهي ارفع بدرجة لأن الانتظــام مطلوب ومحترم . وكانت ، في الواقع ، الأطفال غير المنتظمة تكسر ويعاد تشكيلها بانتظام ، وكانت هذه العملية في كثير من الأحيان مهلكة . اما الاناث في ذلك المجتمع فكانوا شديدي النحافة واشبه بكائنات إبرية ، وقد انتزعن الاعجاب بمشيتهن المتمايلة . اما المربع فيتلاءم مع كل ما نبغي من ربط الأرض المسطحة به .

وللأرض المسطحة أخلاقياتها الرياضية أيضا . يندهش بطل الرواية عندما تظهر في عالمه فجاة دائرة متغيرة المساحة ، فالدائرة هذه هي تقاطع كائن ثلاثي الأبعاد وهو الكرة مع الأرض المسطحة . تشرح الكرة اسرار

عالم الأبعاد الثلاثة للمربع الذي يبدأ بدوره القاء المواعظ عن المذهب الغريب . يترك الكتاب قارئه وقد سيطر عليه شعور بإمكانية أن يواجه هو نفسه في أحد الأيام كائناً متموجاً متخفياً ، هو في واقع الأمر تقاطع كائن رباعي الأبعاد مع عالمنا الثلاثي الأبعاد .

تشكل المكعبات الرباعية الأبعـــاد وما يماثلها من كرات واشـــكال هندسية اخرى مادة تقليدية لأبحاث الرياضيين وكتابات مؤلفي الخيال العلمي . لنتخيل عالماً رباعي الابعاد يشبه عالمنا الثلاثي الأبعاد ويضم بين ثنياته عوالم كثيرة ثلاثية قريبة من بعضها كما صفحات المخطوطة ، إلاّ انها منفصلة ومختلفة بتشكيلاتها عن بعضها . ونبعد في خيالنا أكثـر بتصورنا امكانية الانتقال من احد هذه العوالم الى عالم آخر عبر العالم الرباعي الأبعـــاد المحيط ، فنصل مثلاً الى احشاء مريض لاستئصال زائدته الدودية .

لقد سمع الكثيرون منا ان اينشتين قد استخدم الزمن كبعد رابع ، كما سمع البعض عن فراغات الأطوار المتعددة الأبعاد في الفيزياء حيث تعتبر المركبات الثلاثة للموقع والمركبات الثلاثة للسرعة جميعها بمثابة احداثيات في عالم سداسي الأبعاد .

تختلف هذه المفاهيم ، على كل حال ، عن الفكرة الكلاسيكية للبعد الرابع والذي يشبه تماماً الأبعاد المألوفة للمكان التي نعيشها ونعرفها جيداً وهي ابعاد فوق وتحت ، يمين ويسار ، أمام وخلف . ترجع القضية الى رياضيي القرن التاسع عشر الذين نجحوا بتعميم الهندسة بحيث تتضمن عدة ابعاد بل ولا نهاية من الأبعاد .

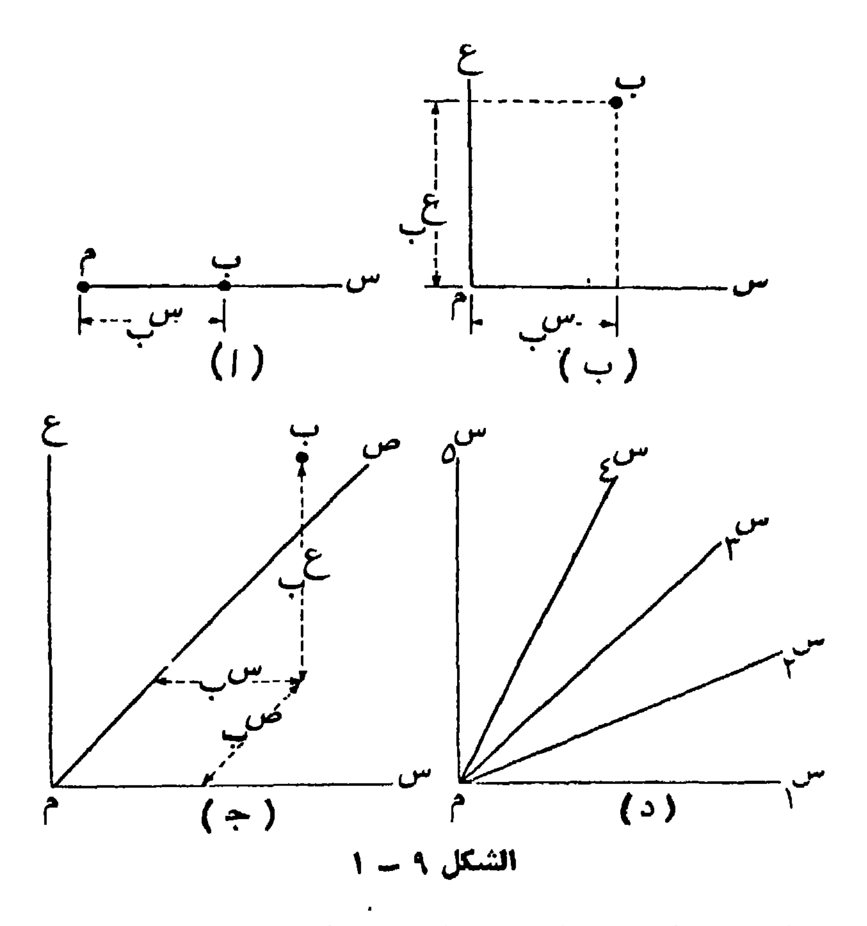
يقف الرياضي من هذه الأبعاد على انها مجرد تشكيلات عقلية . يبدأ بخط يدعوه اتجاه س أو محور السينات ، كما يوضح الشكل ٩ ــ ١ . تقع نقطة ما ــ ب ــ على يمين مبدأ الإحداثيات م على محور السينات . يحدد الاحداثي $س_{ب}$ في الحقيقة موقع النقطة ب .

يضيف الرياضي بعد ذلك خطاً آخر عمودياً على محور السينات هو محور العينات م ع ويستطيع تحديد موقع النقطة ب في عالم البعدين او المستوي حيث يقع هذان المحوران باستخدام عددين او إحداثيين : البعد عن النقطة م باتجاه المحور م ع ، اي الارتفاع $ع_{ب}$ ، والبعد من النقطة م باتجاه المحور م س ، اي البعد الأفقي للنقطة ب .

يوضح الشكل ٩ ــ ١ ايضاً حالة ثلاثة محاور من المفروض أن تكون متعامدة مع بعضها مثنى مثنى ، كما في حالة احرف المكعب . تمثل هذه المحاور الفراغ الثلاثي الأبعاد الذي نعيش ضمنه ، ويتحدد موقع نقطة ب باحداثياتها الثلاثة $س_{ب}$ ، $ص_{ب}$ ، $ع_{ب}$.

طبعاً المحاور الثلاثة كما هي واردة في الشكل غير متعامدة مع بعضها. فما نملكه هنا هو اسقاط منظوري من عالم الإبعاد الثلاثي الى عالم البعدين لمحاور ثلاثة هي في واقعها ضمن العالم الثلاثي الابعاد متعامدة . يقدم لنا القسم الأخير من الشكل ٩ ــ ١ مسقطاً على عالم البعدين لمحاور الاحداثيات في العالم الخماسي الأبعاد . وقد غيرنا هنا المصطلحات قليلا ، اذ ان ارتقائنا في العوالم المتعددة الأبعاد سيستنفذ الاحرف الأبجدية بسرعة ، وهكذا عوضاً عن الاشارة الى الاحداثيات بالأحرف س ، ع ، ص ، اشرنا اليها بالرموز : س ١ ، س ٢ ، س ٣ ، س ٤ ، س ٥ ، تماماً كما يفعل الرياضيون .

مرة اخرى المحاور الخمسة ليست متعامدة في الشكل كما هي الحال في حالة المحاور الثلاثة ، كما اننا لا نستطيع رسم خمسة محاور متعامدة مثنى مثنى في فراغنا الثلاثي الأبعاد ، الا أن الرياضي يستطيع التعامل مع مثل هذه المحاور المتعامدة بشكل عقلي ومنطقي . ويستطيع كذلك جرد الصفات المختلفة للأشكال الهندسية في الفراغ الخماسي الابعاد حيث تحدد النقطة بإحداثياتها الخمسة :



الشكل ٩ — ١

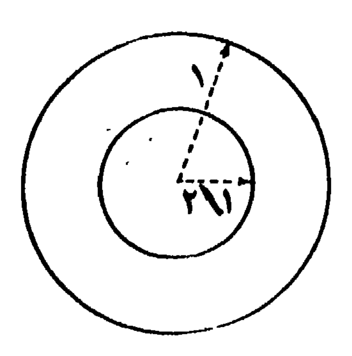
$س_{١ب}$ ، $س_{٢ب}$ ، $س_{٣ب}$ ، $س_{٤ب}$ ، $س_{٥ب}$. ولإكمال المشابهة مع الفراغ العادي (الفراغ الإقليدي) يقول الرياضي أن مربع بعد النقطة ب عن مبدأ الاحداثيات م يعطي بالعلاقة :

$$\overline{\text{م ب}}^{2} = \text{د}^{2} = \text{س}^{2}_{\text{١ب}} + \text{س}^{2}_{\text{٢ب}} + \text{س}^{2}_{\text{٣ب}} + \text{س}^{2}_{\text{٤ب}} + \text{س}^{2}_{\text{٥ب}}$$

يعرف الرياضيون حجم المكعب في الفراغ المتعدد الأبعاد على أنه جداء أضلاعه . وهكذا ففي الفراغ ذي البعدين ، المكعب المعني هو المربع ،

وحجمه في هذه الحالة هو مساحة المربع وتساوي ل٢ ، حيث ل هو ضلع المربع ، يصبح هذا الرقم ل٢ في الفراغ الثلاثي الأبعاد ، حيث ل هو ضلع المكعب المألوف . وفي حالة الفراغ الخماسي الأبعاد يعطي حجم المكعب ذي الضلـع ل بالقيمة له ، وفي الفراغ ذي ٩٩ بعد يكون حجـم المكعب بالمقابل : ل٩٩ .

تتسم خصائص بعض الأشكال في الفراغات المتعددة الأبعاد بكونها سهلة اذا اردنا فهمها ، ومدهشة اذا أردنا اعتبارها . نعتبر على سبيل المثال الحلقة المبينة في الشكل ٩ ـ ٢ والمؤلفة من دائرتين متمركزتين نصفي قطريهما : ½ ، ١ .



الشكل ٩ ـ ٢

ان مساحة الدائرة (الحجم في عالم البعدين) هي Π × ر٢ ، حيث ر هو نصف قطرها ، وبذلك تكون مساحة الدائرة الكبيرة Π

ومساحة الصغيرة $\frac{\Pi}{٤}$ ،وهكذا يقع ربع المساحة الكلية داخل الدائرة الصغيرة .

نفرض أن الشكل ٩ ـ ٢ يمثل كرات ، يساوي حجم الكرة $\frac{٤}{٣}$

π ر٣ وهكذا يقـــع ١/٨ الحجم الكلي للكرة داخـــل الكرة الصغيرة التي نصف قطرها ١/٢ . نعمم ما تقدم بقولنا ، إن حجم الكرة في الفراغ ذي البعدن يتناسب مع رن ، لذلك فاذا اعتبرنا كرة في هـــذا الفـــراغ نصف قطرها ١ ، فإن الجزء من حجمها الواقع داخل كرة متمركزة معها ونصف قطرها ١/٢ ، هذا الجزء من الحجم يســـاوي ١/٢ن ، وهكذا إذا كنا في عالــم سباعي الابعاد اي إذا كانت ن = ٧ ، فإن هذا الجزء يساوي ١/١٢٨ .

نستطيع ان نعمم باتجاه آخر حيث نعتبر جزء الكرة ذات قطر ر المحتوى في كرة متمركزة معها نصف قطرها ٩٩ر. ر . نجد في حالة فراغ ذي ١٠٠٠ بعد أن هذا الجزء من الحجم هو ٤....ر. فقط . وهكذا نحن الآن إزاء النتيجة التي لا مفر منها ، الا وهي أنه في حالة كرة مغمورة في فراغ متعدد الابعاد وعدد ابعاده كبير للغاية فإن كل الحجم تقريباً يقع بقرب السطح .

أوليست كل هذه الأفكار مجرد رياضيات بحتة ملائمة للنخبة فقط . نعم سيبقى هذا هو طابع هـــذه الافكار الى ان نربطها بمسائل العالـــم الفيزيائي . كان للأعداد التخيلية مثل $\sqrt{-1}$ نفس الوضـــع في يوم من الأيام ، اذ لم يكن لها اي قيمة فيزيائية ، ثم ما لبثت أن تسربت الى العالم الواقعي فاصبح لها معانٍ فيزيائية واخرى هندسية كهربائية . هل نتمكن من ايجاد حالة فيزيائية تنطبق عليها خصائص الهندسات المتعددة الأبعاد . نعم يمكننا ذلك ، وخاصة في نظرية الاتصالات . لقد استخدم شانون الهندسة المتعددة الابعـــاد لبرهان نظرية هامة تتعلق بإرسال الإشارات المستمرة ذات الحزم المحددة وبوجود الضجيج .

يقدم لنا عمل شانون مثالا رائعاً عن استخدام وجهـــة نظر جديدة واستثمار نتائج فرع من الرياضيات لم ياخذ طريقه الى التطبيق بعد (في هذه الحالة الهندسة المتعددة الأبعاد) وذلك لحل مشكلة ذات اهمية

عملية كبيرة . أقترح أن نعرج على جانب واسع من محاكمات شانون ، لانها كما اعتقد تشكل مثالا ممتازاً عن الرياضيات التطبيقية . إن تفاصيل هذه المعالجات الرياضيات هي غير مالوفة اكثر من كونها صعبة ، وعلى القارىء ان يركب متنها على حسابه الخاص .

يجب أن نتبنى معياراً عاماً لشدة الإشارة والضجيج وذلك لتحقيق تناول أمثل لمسالة ارسال الإشارات المستمرة بوجود الضجيج . تثبت الطاقة انها المعيار المناسب والمفيد في هذا المعرض .

عندما نبذل قوة مقدارها ١ كغ لمسافة ١ متر لرفع ثقل مقداره ١ كغ لارتفاع ١ متر نقول اننا قمنا بعمل متساوي قيمته ١ كيلو غرامتر ويصبح لدى الوزن بسبب الارتفاع قدرة تساوي ١ كيلو غرامتر . يمكن لهذا الوزن في حالة سقوطه ان يقدم عملا مكافئاً لقدرته يستخدم مثلا لادارة جهـاز مـا .

تعرف الطاقة بانها سرعة تقديم العمل . فإذا قدمت آلة ما عملا مقداره ٦٠ كيلو غرامتر في الدقيقـة ، كانت طاقتها ١ كيلو غرامتر في الثانيـة .

تستخدم الفيزياء واحدات معتمدة للقدرة والطاقة ، فواحدة القدرة هي جول ، وواحدة الطاقة هي واط ، ويساوي الواط جول واحد في الثانيـة .

إذا ضاعفنا الكمون الكهربائي لاشارة ، نزيد إذ ذاك قدرتها وطاقتها بأربعة مرات ، لأن الطاقة والقدرة كلاهما تتناسب مع مربع ذلك الكمون .

رأينا في الفصل الرابع انه يمكننا تمثيل الإشـارة المستمرة بشكل كامل بعدد من العينات مساوٍ لـ ٢ س في كل ثانية إذا كان عرض حزامها س . وبالعكس يمكننا بناء إشارة مستمرة ذات حزام محدود تمر من ٢ س نقطة ممثلة لنفس العدد من العينات التي نختارها في كل ثانية .

نستطيع تحديد وتغيير كل عينة بشكل اختياري دون تغيير باقي العينات ، ويترتب على ذلك تغيير الإشارة المحدودة الحزام .

نقيس سعات العينات بالفولط ، وتمثل كل عينة قدرة متناسبة مع مربع هذه السعة .

وهكذا نستطيع التعبير عن مربعات سعات العينات بدلالة القدرة . نقبل بأن القدرة تساوي مربع سعة العينة إذا تبنينا واحدات خاصة لقياس القدرة ، إن ذلك لن يسبب لنا أي متاعب إضافية .

نصطلح على تسمية سعات العينات المتتالية والمنتقاة بشكل صحيح من إشارة محدودة الحزمة والمقاسة ربما بالفولط ، بالتسميات : $س_1$ ، $س_2$ ، $س_3$ ، ..... الخ ، وستمثل القدرات المقابلة تبعاً لذلك بالرموز : $س_1^2$ ، $س_2^2$ ، $س_3^2$ ، ...... الخ . أما القدرة الكلية للإشارة والتي نرمز لها بالرمز ق ، فتساوي مجموع قدرات العينات أي :

$$ق = س_1^2 + س_2^2 + س_3^2 + ... الخ$$

نلاحظ انه من وجهة نظر الهندسة المتعددة الابعاد ، تساوي القدرة ق مربع بعد نقطة عن مركز الاحداثيات ، اذا كانت احداثيات هذه النقطة هي $س_1$ ، $س_2$ ، $س_3$ ، .... الخ .

وهكذا إذا مثلنا سعات العينات من إشارة محدودة الحزام بإحداثيات نقطة في فراغ متعدد الأبعاد ، كانت النقطة ذاتها ممثلة للإشارة الكاملة أي كل العينات مأخوذة دفعة واحدة ، كما يمثل مربع بعد النقطة عن مبدأ الإحداثيات قدرة الإشارة الكاملة .

لماذا ينبغي علينا تمثيل الإشارة بهذه الطريقة الهندسية ؟ السبب هو أن شانون فعل ذلك لبرهان نظرية هامة في نظرية الاتصالات تتعلق بتأثير الضجيج على إرسال الإشارات .

نستذكر النموذج الرياضي لمصدر الاشارات الذي تبنيناه في الفصل الثالث عند محاولتنا البحث عن طريقة لتحقيق هذا الهدف . فقد فرضنا عندئذ ان المصدر ساكن ومستقر ، وما علينا هنا الآن أن نسحب هذا الفرض على الضجيج المعتبر وعلى جملة الاشارة والضجيج .

انه ليس أمراً مستحيلاً من حيث المبدأ ان مصدراً كهذا سينتج الاشارة أو الضجيج وفق تتالٍ مديد من عينات عالية القدرة جداً أو منخفضة القدرة جداً ، وليست الاستحالة هنا بأكثر من استحالة توليد مصدر مستقر لسلاسل أحرف أبجدية يتواتر فيها الحرف E بكثرة . الواقع ان الامر هذا قليل الاحتمال وحسب . نتعامل هنا مع النظرية التي واجهناها لاول مرة في الفصل الخامس . يولد المصدر المستقر صنفاً محتملاً من الرسائل وصنفاً غير محتمل اطلاقاً لدرجة اننا نتمكن من اهماله . تنطبق حالة الرسائل غير المحتملة عندما تكون الطاقة الوسطية للعينات المنتجة بعيدة جداً عن المتوسط الزمني (ومتوسط المجموعة) المميز للمصدر المستقر .

وهكذا فهناك طاقة متوسطة ذات معنى للاشارة في حالة كل الرسائل الطويلة التي علينا اعتبارها ، وهذه الطاقة المتوسطة غير متغيرة مع الوقت ونستطيع تحديدها باضافة القدرات لعدد كبير من العينات المتتالية ثم قسمة المجموع على الفترة الزمنية التي بثت خلالها هذه العينات . عندما نجعل هذه الفترة اكبر واكبر وعدد العينات اكثر واكثر ، نقترب من القيمة المتوسطة الصحيحة بشكل مطرد . ان الطاقة المتوسطة التي نحصل عليها بهذا الشكل ستكون هي نفسها بصرف النظر عن المجموعة المتتالية من العينات التي نعتبرها .

نستطيع اعادة صياغة ما تقدم في جمل مختلفة . لا يتغير مجموع قدرات عدد كبير من العينات المتتالية المنتجة من قبل مصدر مستقر الا في حدود طفيفة ومهملة ويبقى ثابتاً بصرف النظر عن المجموعة المعينة من العينات المتتالية التي نعتبرها . ان هذا ينطبق على كل الحالات تقريباً باستثناء حالات نادرة بعيدة الاحتمال جداً .

تمكننا حقيقة كون المصدر من النوع المستقر من قول المزيد . ان قدرة نفس العدد الكبير من العينات المتتالية ستكون من وجهة النظر العملية هي نفسها ، بصرف النظر عن الاشارة المعنية التي يولدها المصدر ، كما تنخفض الفروق بين القدرات بازدياد عدد العينات .

نمثل الاشارات المتولدة عن مصدر بنقاط في الفراغ المتعدد الأبعاد . نستعيض عن الاشارة التي عرض حزامها س ومدتها ز بعدد من العينات مساو لـ ٢ س ز ؛ ونعتبر سعة كل عينة مقابلة لواحد من احداثيات هذا الفراغ . اذا كانت القيمة المتوسطة لقدرة كل عينة هي ق ، كانت قدرة كل العينات هي ٢ س ز ق اذا كان العدد س ز كبيراً بما فيه الكفاية . رأينا ان القدرة الكلية تمثل بعد النقطة المثلة للاشارة عن مبدأ الاحداثيات وهكذا عندما يزداد عدد العينات يكبر بالمقابل وبشكل تدريجي الحيز الذي تقع ضمنه النقاط المثلة للاشارة المختلفة ذات المدد المتساوية والمنتجة من قبل المصدر ، أي تقترب تلك النقاط من سطح الكرة الكبيرة ذات نصف القطر : $\sqrt{\text{٢ س ز ق}}$ ان وقوع هذه النقاط بقرب السطح لا يبدو غريباً اذا تذكرنا انه من أجل جسم متعدد الابعاد يقع الحجم تقريباً باكمله قرب السطح .

لا نستقبل الاشارة نفسها ، بل نستقبلها مضافاً اليها الضجيج . يطلق على الضجيج الذي يعتبره شانون اسم ضجيج غاوس الابيض . تعكس كلمة الابيض حقيقة احتواء الضجيج على كل التواترات على قدم المساواة ، ونفرض ان الضجيج يحتوي على التواترات حتى حد أعلى (س) هـ ف ث ولا يحتوي تواتر اكبر من هذا الحد . اما كلمة غاوس فتشير الى قانون احتمال عينات ذات سعات مختلفة ، وهو قانون يصلح لعدة مصادر طبيعية للضجيج . تعتبر كل عينة من أصل هذا الضجيج الغاوسي ذي الـ ٢ س عينة المثلة له ، غير مرتبطة بسواها ومستقلة عنه . اذا عرفنا القدرة المتوسطة للعينات والتي ترمز لها ن ، فان معرفة قدرات بعض العينات لا يسمح بمعرفة قدرات العينات الاخرى . ستكون في هذه

الحالة القدرة الكلية لعدد من العينات يساوي ٢ س ز هي ٢ س ز ن اذا كان العدد ٢ س ز كبيراً وستكون القدرة هي نفسها تقريباً لاي متتالية من عينات الضجيج تضاف الى عينات الاشارة .

رأينا أن متتالية معينة من عينات الاشـارة يمكن تمثيلها بنقطـة في الفراغ المتعدد الابعاد تبعد $\sqrt{\text{٢ س ز ق}}$ عن مبدا الاحداثيات . اما النقطة المقابلة لمجموع الاشارة والضجيج فتتمثل بنقطة ابعد قليلاً عن تلك الممثلة للاشارة . نرى في الواقع أن البعد بين النقطة الممثلة للاشارة والنقطـة الممثلة لمجموع الاشارة والضجيج هو $\sqrt{\text{٢ س ز ن}}$ وهكذا تقع النقطـة الممثلة لمجموع الاشارة والضجيج في كرة صغيرة متعددة الابعاد مركزها النقطة الممثلة للاشارة ونصف قطرها $\sqrt{\text{٢ س ز ن}}$.

اننا لا نتلقى الاشارة فقط ، فنحن نتلقى اشارة قدرتها الوسطية ق لكل عينة مع ضجيج غاوسي قدرته الوسطية ن لكل عينة . وتكون القدرة الكلية المستقبلة خلال فترة زمنية مقدارها ز : ٢ س ز (ق + ن) وتقع النقطة الممثلة لمجموع الضجيج والاشارة في كرة متعددة الأبعاد نصف قطرها $\sqrt{\text{٢ س ز (ق + ن)}}$.

بعد استقبالنا للاشارة والضجيج خلال ز ثانية نستطيع ايجاد النقطة الممثلة للاشارة والضجيج . ولكن كيف نستطيع ترشيح الاشارة والحصول عليها على حدة ؛ كـل ما نعلمه أن الاشارة تقع على بعـد $\sqrt{\text{٢ س ز ن}}$ من النقطة الممثلة لمجموع الاشارة والضجيج .

كيف نتاكد من استنتاج اي الاشارات هي التي أرسلت ؟ نفرض اننا نضع داخل الكرة المتعددة الابعاد ذات نصف القطر $\sqrt{\text{٢ س ز (ق + ن)}}$ عدداً كبيراً من كرات صغيرة متعددة الابعاد وغير متداخلة مع بعضها وذات انصاف اقطار اكبر بقليل من $\sqrt{\text{٢ س ز ن}}$. نكتفي بعد ذلك بإرسال الاشارات الممثلة بمراكز هذه الكرات الصغيرة .

عندما نستقبل عدداً من العينات ٢ س ز من اي من هذه الاشارات مضافاً اليها عينات الضجيج ، فان النقطة المقابلة في الفراغ المتعدد الابعاد ستقع داخل الكرة المتعددة الابعاد الصغيرة المعنية المحيطة بالنقطة الممثلة للاشارة المعتبرة وليس ضمن اي كرة اخرى . وسبب ذلك ، انه كما رأينا في حالة سلاسل العينات الطويلة المنتجة من قبل مصدر ضجيج مستقر ، تقع النقطة الممثلة لهذه العينات تقريباً على سطح كرة نصف قطرها $\sqrt{٢ \text{ س ز ن}}$. وهكذا يمكن تمييز الاشارة المرسلة ودون خطأ رغم الضجيج .

ماهو عدد الكرات المتعددة الابعاد وغير المتداخلة ذات انصاف الاقطار $\sqrt{٢ \text{ س ز ن}}$ التي يمكن وضعها داخل كرة نصف قطرها : $\sqrt{٢ \text{ س ز } (\text{ن} + \text{ق})}$. ان هذا العدد لا يمكن ان يتجاوز بحال من الاحوال نسبة حجم الكرة الكبيرة الى احدى الكرات الصغيرة .

تتحدد ابعاد الفراغ المعتبر بعدد عينات الاشارة والضجيج ٢ س ز . يتناسب حجم كرة في فراغ متعدد الابعاد مع $ر^{م}$ ، حيث ر هو نصف قطر الكرة و م ابعاد الفراغ . وهكذا تكون نسبة الكرتين المذكورتين :

$$\left(\frac{\sqrt{٢ \text{ س ز } (\text{ن} + \text{ق})}}{\sqrt{٢ \text{ س ز ن}}} \right)^{٢ \text{ س ز}} = \left(\frac{\text{ق} + \text{ن}}{\text{ن}} \right)^{\text{س ز}}$$

يشكل هذا العدد حداً لعدد الرسائل المختلفة التي يمكن ان نبثها خلال الفترة الزمنية ز . اما لوغاريتم هذا العدد فهو عدد واحدات البيت التي يمكن ان نرسلها :

$$\text{س ز} \cdot \text{لع} \left(\frac{\text{ق} + \text{ن}}{\text{ن}} \right)$$

يساوي بالتالي عدد واحدات البيت في كل ثانية

$$\text{ص} = \text{س} \ \text{لع} \left(1 + \frac{\text{ق}}{\text{ن}} \right)$$

يتيح لنا وصولنا الى هذه المرحلة ، ملاحظة ان نسبة متوسط القدرة لكل عينة من الاشارة الى متوسط القدرة لكل عينة من الضجيج يجب ان تساوي نسبة الطاقة الوسطية للاشارة الى الطاقة الوسطية للضجيج ، وهذه النسبة الاخيرة تساوي النسبة $\frac{\text{ق}}{\text{ن}}$ الواردة في العلاقة الاخيرة .

بينت المناقشة السابقة انه لا يمكن ارسال اكثر من ص بيت في كل ثانية في حالة حزام عرضه (س) هـ ف ث وباستخدام اشارة طاقتها ق ممزوجة بضجيج طاقته ن . ذهب شانون ابعد من ذلك مستخدماً حقيقة ان حجم الكرة المتعددة الابعاد محتوى باكمله تقريباً قرب السطح ومبيناً بالتالي أن سرعة اصدار الاشارات تقترب من القيمة ص في العلاقة السابقة بقدر ما نريد وبعدد صغير من الاخطاء وفق ما نرغب . وهكذا فالقيمة ص في العلاقة الاخيرة هي سعة القناة في حالة قناة مستمرة أضيف ضجيج غاوسي الى الاشارة عبرها .

سنعمد الى مقارنة العلاقة الاخيرة مع علاقات سرعة الارسال والمعلومات التي اقترحها نيكويست وهارتلي عام ١٩٢٨ والتي شرحناها في الفصل الثاني . يذهب نيكويست وهارتلي الى ان عدد الارقام الثنائية التي يمكن ارسالها في كل ثانية هو : ل لع م ، حيث م هو عدد الرموز المختلفة ، ول هو عدد الرموز المرسلة في كل ثانية .

ان احد أنواع الرموز التي يمكننا أن نعتبرها هو قيم معينة للكمون الكهربائي : + ٣ ، + ١ ، - ١ ، - ٣ . لقد كان نيكويست على علم ، مثلنا نحن الآن ، بأن عدد العينات المستقلة او قيم الكمون التي يمكن

ارسالها في كل ثانية هو ٢ س ، باستخدام هذه الحقيقة يمكننا اعـادة كتابة العلاقة الاخيرة على الشكل :

$$\text{ص} = \frac{\text{ل}}{٢}\ \text{لع}\left(١ + \frac{\text{ق}}{\text{ن}}\right)$$

$$\text{ص} = \text{ل}\ \text{لع}\sqrt{\left(١ + \frac{\text{ق}}{\text{ن}}\right)}$$

اننا هنا نعيد تقفي آثار الخطوات التي قادتنا الى ص ، وقد وصلنا في العلاقة المعبرة عنها الى العدد الوسطى م للرموز المختلفة التي يمكننا ارسالها بكل عينة ، وذلك بدلالة نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج. اذا نقصت طاقة الاشارة او زادت بالقابل طاقة الضجيج بحيث قربت النسبة $\frac{\text{ق}}{\text{ن}}$ من الصفر ، فان القيمة المتوسطة لعدد الرموز المختلفـة التي يمكننا ارسالها في كل عينة تقترب ايضاً من الصفر ، لان لع ١ = ٠ ، ويستتبع ذلك أن سعة القناة ص في هذه الحالة تقترب من الصفر أيضاً، وعلى العكس تزداد بشكل مطرد القيمة المتوسطة المشار اليها وسـعة القناة اذا زدنا النسبة $\frac{\text{ق}}{\text{ن}}$ أي نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج.

لقد تعاظم فهمنا لكيفية ارسال عدد متوسط كبير من الرموز المستقلة بكل عينة بأكثر مما علمنا نيكويست أو هارتلي . نحن نعرف الآن أن تنفيذ ذلك بشكل فعال يقتضي بشكل عام الا نحاول اجراء عملية الترميز لرمز واحد كعينة كمون كهربائي محددة ومعدة للارسال بذاتها . على العكس يجب علينا على الدوام اللجوء الى ترميز التراكيب بحيث ترمز سلسلة طويلة من الرموز باستخدام مجموعة كبيرة متتالية من العينات . وهكذا اذا كانت نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج هي ٢٤ ، نستطيع ارسال عدد من الرموز المختلفة بكل عينة مساو $\sqrt{١ + ٢٤} = \sqrt{٢٥} = ٥$ بشكل وسطي ، إلا اننا لا نستطيع ارسال ٥ رموز مختلفة بواسطة عينة محـددة .

اوضحنا في الشكل ٨ ــ ١ من الفصل الثامن كيفية ارسال الارقام الثنائية بمعدل رقم واحد عند كل لحظة وبوجود الضجيج وذلك باستخدام اشارة موجبة او سالبة ذات سعة معينة ، اصطلحنا على ربطها بالرقم ١ اذا كان مجموع الاشارة والضجيج موجباً ، وربطها بالرقم . اذا كان هذا المجموع سالباً نفرض اننا نستطيع تقوية الاشارة بمقدار كافٍ بالمقارنة مع الضجيج الذي نفرضه غاوسي ، بحيث تكون نسبة الارقام المستقبلة الخاطئة $\frac{١}{١٠٠٠٠٠}$. تشير الحسابات الى أن ذلك يستدعي ستة أضعاف طاقة الاشارة مع الحفاظ على نفس عرض الحزام وطاقة الضجيج . تنجم حاجتنا للطاقة الاضافية من اننا نستخدم لتمثيل الاشارة نبضة قصيرة اما موجبة او سالبة مقابلة لرقم ثنائي واحد ولا نستخدم احدى الاشارات الطويلة المؤلفة من عدة عينات مختلفة ذات سعات متباينة مقابلة لعدة أرقام ثنائية متتالية .

اما في حالة طاقة وسطية منخفضة للاشارة وطاقة عالية للضجيج ، فان احدى الطرق الخاصة لتحقيق سرعة مثالية في الارسال أو الوصول الى سعة القناة ، تتجسد بتركيز طاقة الاشارة في نبضة قصيرة وقوية وارسال تلك النبضة في احدى اللحظات الزمنية التي تمثل منها رمزاً مختلفاً . نستطيع في هذه الحالة الخاصة وغير العادية أن نرسل وبشكل فعال الرموز بمعدل رمز عند كل لحظة .

اذا رغبنا تحقيق حد شانون من أجل عرض حزام معين ، فيجب أن تكون عناصر الترميز اشارات موجبة معقدة طويلة أشبه بالضجيج الغاوسي .

نستطيع أن نغير نظرتنا ازاء لعلاقة الاخيرة التي أعطتنا قيمة ص ، فبدلاً من أن نتناولها من المنظور الضيق الذي تقدم الينا من خلاله عدد واحدات البيت في الثانية التي يمكننا ارسالها عبر قناة اتصال معينة ،

نترجمها وفق منظور آخر تطلعنا بموجبه عن امكانيات ارسال اشارة ذات عرض حزام معين وقيمة مطلوبة للنسبة (ق/ن) أي نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج عبر قناة ارسال معينة لها بالمقابل عرض حزام ونسبة مختلفين . نفرض مثلاً أن نسبة (ق/ن) هي ١٠٠٠ ، وعرض الحزام ٤ مليون هزة في الثانية ، عندها تكون سعة القناة ص :

ص = ٤٠ ٠٠٠ ٠٠٠ بيت في الثانية

يمكن ان نصل الى نفس سعة القنال هذه ، بقيم مختلفة للنسبة وعرض الحزام وفق الجدول المثالي التالي :

عرض الحزام س	النسبة (ق/ن)
٤٠٠٠ ٠٠٠	١٠٠٠
٨٠٠٠ ٠٠٠	٣٠ر٦
٢٠٠٠ ٠٠٠	١٠٠٠٠ ٠٠٠

يوضح هذا الجدول انه لتحقيق سعة قناة معينة اما أن نستخدم حزام أعرض ونسبة اخفض ، أو نستخدم حزام أضيق ونسبة اكبر .

ادهشت العاملين الأوائل في نظرية المعلومات فكرة تخفيض عرض الحزام في مقابل زيادة الطاقة المستخدمة ، اذ ان هذا يستدعي كمية كبيرة من الطاقة . اثبتت الخبرة انه من المفيد والعملي ان نزيد عرض الحزام بحيث نحصل على قيمة جيدة لنسبة الطاقة الى الضجيج باستخدام طاقة أقل مما قد يلزم في احوال اخرى .

ان هذا هو ما يتم فعله ، على سبيل المثال ، في ارسال التواتر المعدل ففي هذا المثال تعتبر سعة معينة للاشارة التي سترسل ، كالموسيقى مثلا

وترمز كاشارة راديو ذات تواتر معين . يؤدي ازدياد ونقصان سعة الاشارة المرسلة الى تغير كبير جدا في تواتر الاشارة المعدلة الممثلة لها وهكذا فبارسال اشارة موسيقية عرض حزامها ۱۵۰۰۰ هرتز ان استخدام ارسال التواتر المعدل لحزام اكثر عرضا من الموسيقى التي يمثلها ، يفضي الى نتيجة مفادها ان نسبة الاشارة الى الضجيج في الموسيقى المستقبلة ستكون اكبر بكثير من نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج في الاشارة ذات التواتر المعدل التي تصل الراديو ان طريقة تعديل التواتر لا تشكل نظاما فعالا نموذجياً ، اذ انها لا تستجيب للتحسينات التي تضيفها العلاقة الاخيرة لسعة القناة ص .

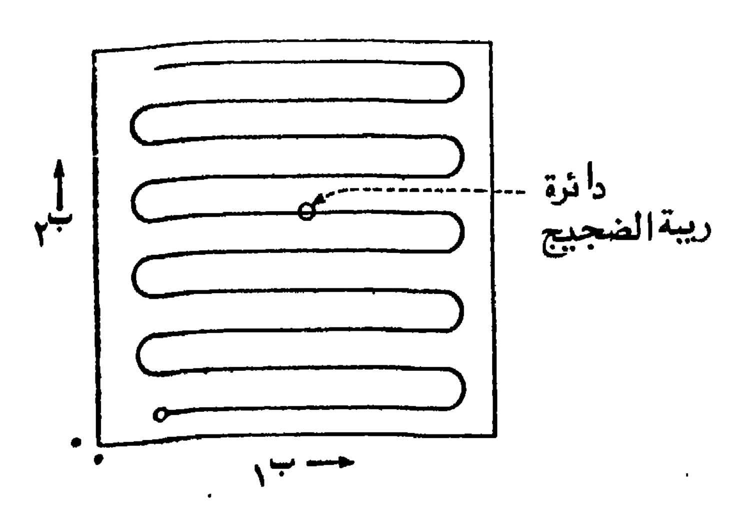
يتابع عباقرة الاتصالات وبشكل مستمر اختراع انظمة تعديل محسنة وقد اقترح علي بعضهم واكثر من مرة انظمة جديدة تحقق ما هو افضل من علاقة سعة القناة ص الاخيرة ، ووفق ما تسمح به السعة المثالية للقناة . كانت كل الاقتراحات معقولة من حيث المبدأ ، الا انني كنت أعلم ان شيئاً ما غير صحيح ، تماماً كما في حالة الآلات الدائمة الحركة . لقد اظهر التحليل المتأني مكامن الخطأ . وهكذا تطلعنا نظرية الاتصالات على ما لا يمكن انجازه وتقترح الممكن كذلك .

الا أن هناك شيئاً واحداً لا يمكن تحقيقه فيما يتعلق بتحسين نسبة الاشارة الى الضجيج خاصة اذا زدنا عرض الحزام ، اما هذا المستحيل فهو ان نحقق نظاماً بامكانة التصرف بشكل منتظم ومتجاوب لكل القيم المختلفة لنسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج .

ربطنا في مطلع هذا الفصل الاشارة بنقطة في فراغ متعدد الابعاد حيث يساوي عدد هذه الابعاد عدد العينات المعتبرة . ان ارسال اشارة ذات حزام ضيق فيها عدة عينات باستخدام اشارة ذات حزام عريض فيها عدد اكبر من العينات يعني ان ننفذ عملية ارتسام من نقاط فراغ متعدد الابعاد الى نقاط في فراغ آخر متعدد الابعاد ذي عدد أكبر من الابعاد وان يكون هذا الارتسام من نوع واحد ـ لواحد .

برهنا في الفصل الاول نظرية تتعلق بارتسام نقاط من فراغ ثنائي الأبعاد (مستوي) الى نقاط من فراغ احادي الابعاد (مستقيم) . وذكرنا في ذلك المعرض اننا اذا نفذنا ارتسام كل نقطة من المستوى الى نقطة وحيدة مقابلة على المستقيم ، فان الارتسام لا يمكن ان يكون مستمرا ، ومعنى ذلك اننا اذا تحركنا بشكل مستمر وناعم عبر مسار في المستوى من نقطة الى نقطة مجاورة ، فان المرتسم المقابل على المستقيم سيتحدد بقفزات الامام والخلف . تنطبق هذه النظرية حرفاً بحرف على كل الارتسامات من نقاط فراغ الى نقاط فراغ آخر مختلف الابعاد . يمكن لهذه الحقائق ان تعطي كل المتاعب في انظمة الارسال حيث يمثل عدد قليل من عينات الرسالة بعدد اكبر من عينات الاشادة .

يعطي شانون مثالا بسيطا على هذا النوع من المتاعب والموضح في الشكل ٩ ــ ٣ .



الشكل ٩ ــ ٣

نعرض اننا نستخدم عينتين من السعات : ب١ ، ب ٢ لتمثيل سعة وحيدة حـ . نعتبر ان الكميتين ب١ ، ب٢ كاحداثيتين كما هو موضح

نرسم داخل المربع خطاً متلوياً يبدأ بقرب الزاوية السفلى اليسارية ويندرج في الصعود نحو الاعلى . نصطلح على ان البعد مقاساً على هذا الخط هو حـ كمون او سعة الاشارة التي سترسل ،على ان يجري القياس بدءا من اول الخط وحتى نقطة معينة منه .

تقابل اي قيمة معينة لـ حـ قيمتين ب١ ، ب٢ . نلاحظ ان مجال ب١ و ب٢ اصغر من مجال حـ . نستطيع ان نرسل ب١ ، ب٢ ، ثم نستعيد بدقة بالغة ، او لا نستطيع ذلك ؟

لنفرض ان قليلا من الضجيج قد تسرب الى ب١ و ب٢ ، بحيث اننا اذا اردنا تحديد حـ عند المستقبل فسنجد انفسنا في دائرة من الريبة بسبب الضجيج اذا كان قطر الدائرة أقل من البعد بين لفات المسار المنحني نستطيع تحديد القيمة الصحيحة لـ حـ بخطا اقل بكثير من الخطأ في كل من ب١ ، ب٢ ، اما اذا كان الضجيج اكبر ، عندها لن نستطيع التأكد من لفة المنحني التي تقع عليها حـ ، وبذا سنرتكب خطأ اكبر في تقدير حـ .

يبدو انه لا مفر من هذا السلوك في الانظمة المشابهة لنظام تعديل التواترات حيث يستخدم حزام عريض بهدف الحصول على قيمة اجود لنسبة الاشارة الى الضجيج .

عندما يزداد الضجيج المضاف الى الارسال ، يزيد بدوره وبشكل تدريجي الضجيج في الاشارة المستقبلة ، الا انه لا يلبث ان يزيد على تقفزات وبشكل كارثي . يقال عند هذه النسبة للاشارة الى الضجيج أن نظام الارسال قد انكسر . وها نحن امام مثال تطلعنا من خلاله نظرية رياضية مجردة ان هناك سلوكا معيناً لا يمكن تحاشيه في انظمة الاتصالات الكهربائية بصورة عامة .

لقد كان التناول في هذا الفصل هندسياً بشكل اساسي . وهذه هي احدى طرق معالجة الاشارات المستمرة ، وفي الواقع يعطي شانون في كتابه عن نظرية الاتصالات طريقة اخرى قابلة التطبيق لكل انواع

الاشارات والضجيج وتبقى للطريقة الهندسية اهمية خاصة ، اذ تثبت هذه الطريقة انها مثمرة وفعالة في عدة مسائل ذات صلة بالاشارات الكهربائية التي ليست من صلب نظرية الاتصالات .

وصلنا هنا الى هندسة للاشارات المحدودة الحزام بانتقاء عينات الاشارات ومن ثم اعتبار سمات العينات كاحداثيات نقطة في فراغ متعدد الابعاد . الا انه من الممكن أن نصب الاشارات محدودة الحزام في قالب هندسي دون اللجوء الى العينات ، وقد حقق ذلك فعلا الرياضيون المهتمون بمسائل ارسال الاشارات . لقد اصبح من المعتاد تمثيل الاشارات المحدودة الحزام كنقاط في فراغ اشارات متعدد الابعاد أو فراغ توابع ومن ثم برهان النظريات المتعلقة بالاشارات بتطبيق اساليب الهندسة . ان للتمثيل الاخير اهمية كبرى اذ يمكن الرياضيين من استنباط وصياغة قضايا صحيحة تغطي كل الاشارات المحدودة الحزام او كل صنوف الاشارات المحدودة الحزام ، دون اعتبار التفاصيل المضللة لاشارات معينة ، تماماً كما يفعل الرياضيون لدى صياغتهم قضايا صحيحة عن كل المثلثات او كل المثلثات القائمة . ان فراغ الاشارات هو اداة قوية بين ايدينا ، أو بالاحرى بين عقول الرياضيين المبدعين ، وكل ما نستطيعه ان نعجب ونتعجب .

كانت مهمتنا الرئيسية في هذا الفصل ، من وجهة نظر نظرية الاتصالات ، ان نبرهن نظرية تتعلق بقناة مستمرة ذات ضجيج . لقد تضمنت العلاقة الاخيرة لسعة القناة ص هذه النظرية ، حيث اعطت العلاقة المذكورة السرعة التي يمكننا وفقها ارسال الارقام الثنائية باقل ما يمكن من الاخطاء عبر قناة مستمرة حيث تمزج اشارة عرض حزامها س وطاقتها ق مع ضجيج غاوسي ابيض عرض حزامه س وطاقته ن .

كان نيكويست منذ عام ١٩٢٨ على علم بامكانية ارسال عدد مستقل من الرموز مساو لـ ٢ س في كل ثانية عبر قناة عرض حزامها ٢ س ، الا انه كان يجهل عدد الرموز المختلفة التي يمكن ارسالها في كل ثانية من اجل نسبة معينة لطاقة الاشارة الى طاقة الضجيج . اما نحن فقد

حسبنا ذلك العدد لحالة معينة وشائعة من الضجيج ، وكذلك استطعنا ان نعرف ان امكان ارسال عدد وسطي من الرموز م لكل عينة في الثانية لا يعني نجاح المحاولةبترميز الرموز المتتالية بشكل مستقل ككمونات محددة ، على العكس يجب ان نستخدم ترميز التراكيب ، حيث يتم ترميز عدد كبير من الرموز المتتالية دفعة واحدة .

تؤكد علاقة سعة القناة ص امكانية استخدام اشارة ذات حزام عريض ونسبة ضئيلة للاشارة الى الضجيج لتحقيق بث رسالة ذات حزام صغير ونسبة عالية للاشارة الى الضجيج ، وابرع مثالي عملي على ذلك هو تعديل التواتر . سنعود الى متابعة هذه الاعتبارات في الفصل العاشر .

كان لهذا الفصل جانب آخر ، فقد اوضحنا فيه استخدام افكار جديدة وتطبيق اداة رياضية قوية في حقل نظرية الاتصالات . لقد حققنا علاقة سعة القناة ص بتطبيق حيلة بارعة وغامضة الى حد ما هي تمثيل الاشارات الكهربائية الطويلة والضجيج المضاف اليها بنقاط في فراغ متعدد الابعاد . واصطلحنا على ان يكون مربع بعد النقطة عن مبدأ الاحداثيات في الفراغ المتعدد الابعاد هو طاقة الاشارة التي تمثلها النقطة .

وهكذا اختزلنا مسألة في نظرية الاتصالات الى مسألة مقابلة في الهندسة ، ووصلنا الى النتائج المرجوة بمناقشات هندسية محضة . ولعلنا نلاحظ ان التمثيل الهندسي للاشارات قد اضحى اداة رياضية فعالة في دراسة الاتصالات وخصائص الاشارات .

ان اختزال مسائل الاشارات الى الهندسة هو عمل مهم بحد ذاته وهو مثال حي عن قيمة البحث عن وسائل رياضية متجددة تتناسب مع التعقيد المتزايد للمسائل التي يطرحها تطور التكنولوجيا المتصاعد . وكل ما نامله ان نطبق هذا النظام في التفكير على كل المشاكل المتزايدة في الصعد الهندسية المختلفة .



الفصل العاشر

نظرية المعلومات والفيزياء

قدمت في الفصل الثاني لمحة تاريخية عن نظرية الاتصالات ، واوضحت حينئذ ان هذه النظرية وليدة الاتصالات الكهربائية ، وكما نعلم فان دراسة التيارات الكهربائية والمجالات الكهرطيسية تقع في القلب من الفيزياء الحديثة .

لم تكن الكهرباء لتقدم كوسيلة للاتصالات بالنسبة لمورس ومعاصريه الا امكانيات محدودة بالمقارنة مع الصوت الانساني او الكتابة . لقد كان على هؤلاء الباحثين ان يصمموا طرقاً للترميز يمكن بواسطتها تمثيل الاحرف الأبجدية بسلسلة من نبضات القطع والوصل الكهربائية . وقد قادت مسالة ترميز الرسائل بشكلها العام الى الافكار المحدثة حول موضوع الترميز . وطالما ان القضية برمتها تنحصر في البحث عن وسيلة للترميز باستخدام التيار الكهربائي ، فها نحن الآن أمام علاقة نوعية بين الترميز وظاهرة فيزيائية محددة . اننا امام رابطة تضم نظرية الاتصالات والفيزياء .

وقد رأينا ايضا أن الاشارات التي نرسلها عبر الاسلاك او بواسطة الراديو ستصل ممزوجة ببعض التشويشات التي اطلقنا عليها اسم الضجيج . وهذا أمر يمكن تحاشيه الى حد ما ، اذ يمكن تخفيض الضجيج الذي يصل الى اجهزة الاستقبال بتبني تصميم مناسب وابتكار اختراعات جديدة . ففي حالة استقبال اشارات الراديو نستخدم

هوائياً يتلقى الاشارات بشكل فعال من اتجاه ارسال المصدر ويكون أقل حساسية للاشارات القادمة من اتجاهات اخرى ، كما نستطيع التاكد من ان جهاز الاستقبال لدينا يتجاوب مع التواترات التي نرغب باستخدامها ولا يأبه للاشارات المتداخلة ولا للضجيج من تواترات اخرى .

وعلى الرغم من كل هذه الاجراءات ، فسيبقى هناك حد ادنى من الضجيج ممزوج مع الاشارة التي نستقبلها ، وقد يتاتى بعض هذا الضجيج من أجهزة اقلاع السيارات او مصادر طبيعية كالبرق والصواعق وحتى في حالة غياب البرق والصواعق فسيستمر الضجيج طالما بقيت حرارة في الكون . لاحظ براون ، وهو بيولوجي بريطاني ، منذ سنين عديدة ، كيف ان حبات غبار الطلع المعلقة في سائل ما تتحرك بشكل عشوائي عندما ننظر اليه في المجهر ، فبعضها يتحرك جيئة والآخر ذهابا وبعضها يتسارع ، وعلى العكس يتباطأ البعض الآخر ، دعي هذا الطراز من الحركة بالحركة البروانية ، وتنجم هذه الحركة بشكل أساسي من ارتطام الذرات والجزئيات ببعضها .. كان الانجاز العلمي المبكر لاينشتاين هو ابداع نموذج رياضي للحركة البراونية .

كان من الممكن لحبات غبار الطلع التي شاهدها بروان ان تبقى ساكنة لو كانت الجزئيات المحيطة بها ساكنة ، الا ان جزئيات السائل نفسها في حركة دائمة ، وهذه الحركة بحد ذاتها هي التي تتمخض عن ظاهرة الحرارة . تتحرك جزئيات الغازات بشكل غير منتظم وبسرعة او ببطء أثناء الفترات الزمنية الفاصلة بين اصطداماتها مع جزئيات أخرى ، أما في السوائل فتحتشد الجزئيات وتتدافع عن قرب مغيرة امكنتها بشكل مستمر وبسرعة او ببطء ايضاً . يختلف الامر في الاجسام الصلبة حيث تهتز الذرات وتراوح حول مواقع سكونها النسبية ، تارة بسعات عالية واخرى بسعات منخفضة الا انها لا تغادر مواقعها بالنسبة للجوار اطلاقا وهكذا تتحرك الجزئيات على الدوام سواء في الغازات او في السوائل او في الجوامد ، وتتناسب حركاتها مع وسطي طاقاتها التي تتوقف بدورها على درجة حرارة تلك الاجسام بالنسبة للصفر المطلق (ــ ٢٧٣ درجة

مئوية تقريبا) ، وتختلف اتجاهات وسمات تلك الحركات باختلاف الطاقة والسرعة من جزئي لجزئي .

لا تقتصر الطاقة في كوننا على الطاقة الميكانيكية فقط ، اذ تمتلك الامواج الكهرطيسية طاقة ايضا ، وتتولد هذه الأمواج عن التيارات الكهربائية المتغيرة . تتكون الذرات من نوى موجبة تدور حولهاالكترونات سالبة ، بينما تتركب الجزئيات من ذرات . عندما تهتز جزئيات مادة ما بسبب الطاقة الحرارية ، تولد الحركات النسبية لمكونات تلك الجزئيات امواجاً كهرطيسية ، وتنطوي تلك الامواج على تواترات من بينها ما ندعوه بتواترات امواج الراديو ومنها الحرارة والضوء . يقال ان الجسم الحار يشع امواجاً كهرطيسية ، وتسمى تلك الأمواج اشعاعاً .

ان معدل مايصدره الجسم ، المحفوظ في درجة حررة معينة ، من طاقة محمولة على امواج راديوية او حرارية أو ضوئية تختلف باختلاف مادة الجسم فالأجسام القاتمة تصدر من الاشعاع كمية اكبر مما تصدره الاجسام اللامعة . وهكذا فالفضة ، المعروفة بلمعانها لانها تعكس امواج الراديو والحرارة والضوء الساقطة عليها ، هي في واقع الامر مادة قليلة الاشعاع ، في حين ان هباء الفحم للحجر الأسود اكثر اشعاعاً من الفضة . عندما يسقط الاشعاع على مادة ما ، فان الاشعاع المنعكس ، لا الاشعاع الممتص عموماً ، يختلف باختلاف تواتر الاشعاع الوارد ، من امواج الراديو الى الامواج الضوئية مثلا . الا ان هناك قاعدة عامة تحكم كمية الاشعاع من تواتر معين ، فكمية الاشعاع الصادرة عن مادة ما في درجة حرارة معينة تتناسب مع النسبة من الاشعاع التي يمتصها الجسم عند سقوط هذا الاشعاع عليه . وهكذا فكانما هناك طبقة اشبه بالجلد حول كل مادة تسمح لكمية من الاشعاع الساقط بالعبور وتعكس الباقي ، ويبدو ان نسبة الاشعة التي تعبر تلك الطبقة الجلدية هي نفسها سواء كانت الاشعة واردة على المادة او خارجة منها ولو لم يكن الامر كذلك لاستطعنا ان نتوقع ظاهرة غريبة وغير طبيعية (تناقض ما نعرفه عن قوانين الطبيعة) . لنتخيل علبة محكمة الاغلاق

او فرناً في درجة حرارة ثابتة ، واننا كنا قد علقنا جسمين داخل هذا الفرن ، ولنفرض (خلافاً للواقع) ان احد هذين الجسمين عاكس جيد للاشعاع وماص رديء له وانه في الوقت نفسه مصدر جيد للاشعاع ، اما الجسم الثاني فنفترض انه ماص جيد للاشعاع وعاكس رديء له وانه اخيراً مصدر سيء للاشعاع . لنتصور ان الجسمين كانا في لحظة معينة في درجة حرارة واحدة . ان الجسم الاول سيمتص من الاشعاع اقل مما يصدر وذلك بعكس ما يفعل الجسم الثاني الذي يمتص اكثر مما يصدر . فلو جرت الامور على هذا النحو فان الجسم الثاني سيسخن اكثر من الجسم الاول . ليس هذا هو واقع الامور ، فكل الاجسام الحبيسة داخل علب او افران مغلقة ذات درجات حرارة واحدة ومنتظمة اذ انها لا بد ستصل الى درجات حرارة مساوية لدرجة حرارة العلبة او الفرن ، سواء أكانت تلك الاجسام لامعة عاكسة جيدة للاشعاع وماصة رديئة له ، او قاتمة عاكسة رديئة وماصة جيدة . وهذا لا يمكن ان يحدث الا اذا كانت قابلية امتصاص الاشعاع لا قابلية عكسه مساوية تماماً لقابلية اصداره كما هو واقع الحال في الطبيعة .

ان الامر في القرن الموصد لا يقتصر على بلوغ الأجسام الحبيسة درجة حرارة واحدة ، بل ان هناك شدة اشعاع تتميز بها مثل هذه الأوعية الموصدة . لنتخيل ان ومضة من الاشعاع السائد في هذا الموصد يسقط على أحد جدرانه . ان جزءاً منها سينعكس ليصبح مجرد اشعاع في أجواء الموصد ، بينما سيمتص الجدار الآخر . سيطلق الجدار بدوره كمية معينة من الاشعاع ينضم الى ما هو موجود في جو الموصد . وهكذا فهناك تبادل دائم للاشعاع بين جو الموصد وجدرانه .

اذا كان الاشعاع في الداخل ضعيفاً جداً ، فإن الاشعاع الصادر عن الجدران سيكون اكبر مما يرد عليها ومما تمتصه . أما اذا كان أشعاع الجو كبيراً فإن الجدران ستتلقى وتمتص من الاشعاع اكثر مما تصدر اذا تساوى الاشعاع الساقط على الجدران مع الاشعاع الصادر عنها ، قيل عن الاشعاع بانه في حالة توازن مع المادة المحيطة به . ان لهذا

الاشعاع طاقة تزداد بازدياد درجة الحرارة ، تماماً كما تزداد الطاقة الحركية لجزيئات الغاز أو السائل او الجامد بازدياد سخونتها .

لا تتوقف شدة الاشعاع في الموصد على قابلية جدرانه لعكس الاشعاع او لامتصاصه ، بل تتوقف على درجة حرارة تلك الجدران فقط . اذ لو لم يكن الأمر كذلك ، وعمدنا الى صنع انبوب قصير يصل بين جوف موصد لامع ذي جدران عاكسة ، وبين جوف موصد آخر قاتم وذي جدران ماصة ، وكان الموصدان في درجة حرارة واحدة ، لحصلنا على تدفق اشعاعي من احد الموصدين الى الآخر عبر الأنبوب الا ان مثل هذا الامر لا يحصل أبداً في الواقع .

نستنتج أن هناك شدة اصدار معينة للاشعاع الكهرطيسي ، كالضوء والحرارة وامواج الراديو ، مقابلة لدرجة حرارة معينة . إن الامواج الكهرطيسية تنتشر في الخلاء والهواء والمواد العازلة كالزجاج ، كما يمكن نقلها بالأسلاك . نستطيع في الواقع النظر الى اشارة مرسلة عبر زوج من أسلاك الهاتف من منظورين مختلفين فالاشارة في الآلية الاولى تتالف من تيار الالكترونات يحركها فرق الكمون ، اما في المنظور الثاني فتتكون الاشارة من حقلين ، كهربائي ومغناطيسي ، بين السلكين وحولهما يتحركان مع التيار . وكما ان بإمكاننا اعتبار الاشارات الكهربائية في الأسلاك امواجاً كهرطيسية وبما ان الأجسام الحارة تشع امواجاً كهرطيسية ، فعلينا أن نتوقع بالمقابل امكان أن تولد الحرارة إشارات كهربائية . وقد استطاع ج. ب. جونسون ، مكتشف التقلبات الكهربائية المتسببة عن الحرارة ، توصيف تلك التقلبات لا بدلالة الأمواج الكهرطيسية ، بل بدلالة تقلبات فرق الكمون بين طرفي مقاومة معينة .

واستطاع فيزيائي آخر ، إثر انتهاء جونسون من قياس تلك التقلبات ، استنباط الصيغة النظرية لها بتطبيق قواعد الميكانيك الاحصائي . لم يكن هذا الفيزيائي الا هـ. نيكويست ، الذي ، وكما رأينا في الفصل الثاني ، قدم مساهمة كبيرة في إرساء قواعد نظرية المعلومات .

اما صيغة نيكويست والتي تدعى اليوم ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري ، فتعطى على النحو التالي :

$$\overline{ك^{٢}} = ٤ \; ث \; د \; م \; س$$

حيث $\overline{ك^{٢}}$ وسطي مربع كمون الضجيج ، اي القيمة الوسطية لمربع كمون الضجيج عبر المقاومة المعتبرة . ث هو ثابت بولتزمان :

ث = ١ر٣٧ × $١٠^{-٢٣}$ جول / لكل درجة حرارة د درجة حرارة المقاومة مقاسة بالنسبة للصفر المطلق ، وتدعى درجــة حرارة كالفن وتساوي درجة الحرارة المئوية مضافاً اليها ٢٧٣ . م هي قيمة المقاومة مقاسة بالاوم . واخيراً س هو عرض حزمة التواترات للضجيج مقاساً بالهزات في الثانية (هـ ف ث) .

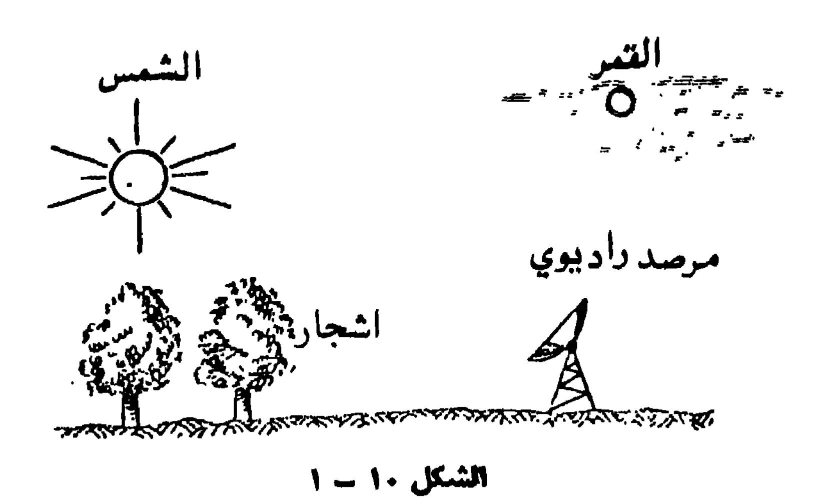
يعتمد عرض الحزمة س بالطبع على خصائص اجهزة القياس لدينا . فلو ضخمنا الضجيج باستخدام مضخم عريض الحزمة لحصلنا على ضجيج اكثر مما لو استخدمنا مضخماً ضيق الحزمة وبنفس المردود . وهكذا نتوقع ضجيجاً اكثر في التلفزيون لانه يضخم الاشارات عبر حزمة يبلغ عرضها عدة ملايين من الهزات في الثانية ، بينما يكون الضجيج اقل في الراديو لانه يستخدم لتضخيم الاشارات حزمة ذات عرض يساوي عدة آلاف من الهزات في الثانية .

راينا ان المقاومة الحارة تنتج ضجيج كمون فلو ربطنا بالمقاومــة الحارة مقاومة اخرى لتدفقت الطاقة الكهربائية الى هذه المقاومة ، واذا كانت هذه المقاومة الأخيرة باردة ، فستقوم الطاقة بتسخينها . وهكذا فالمقاومة الحارة هي مصدر كموني لضجيج طاقة . ما هي القيمة العظمى لاستطاعة الضجيج التي يمكن أن تغذيها ؟ تعطى تلك القيمة بالعلاقة :

$$ن = ث \; د \; س \; .$$

تعتبر هذه العلاقة ، على نحو ما ، اجود من سابقتها . إن لم يكن لسبب فلأنها تحوي عدداً اقل من الحدود ، ولم تعد قيمة المقاومة م ظاهرة فيها . كما ان صياغتها تتيح تطبيقها في حالات اخرى .

نفرض مثلا أن لدينا مرصداً راديوياً ، وهو عاكس مكافيء كبير يقوم بتركيز امواج الراديو على مستقبل عالي الحساسية . اوضحت مثل هذا المرصد في الشكل ١٠ ـ ١ . نفرض أننا نسدد هذا المرصد الى اجسام سماوية او اجسام ارضية مختلفة ، بهدف تلقي الضجيج الصادر عنها بسبب سخونتها .



الشكل ١٠ ـ ١

نحسب طاقة الضجيج الراديوي المستقبل باستخدام العلاقة الأخيرة حيث د هي درجة حرارة الجسم الذي نوجه نحوه المرصد الراديوي .

اذا وجهنا المرصد الراديوي جهة تجمع مائي او ارض ملساء ، فما سيشاهده المرصد في هذه الحالة هو انعكاس للسماء ، أما اذا وجهناه نحو اجسام لا تعكس الأمواج الراديوية بشكل جيد ، كالأعشاب والأشجار المورقة ، نحصل على ضجيج مقابل لدرجة حرارة ٢٩٠ كالفن اي حوالي ١٧ درجة مئوية ، وهي درجة حرارة الأشجار .

ولو وجهنا المرصد نحو القمر ، وكان المرصد محكم التسديد بحيث لا يرى الا القمر دون جواره ، لحصلنا على نفس الضجيج تقريباً وهو ليس ضجيج سطح القمر بل ضجيج ما تحت سطح القمر بعمق حوالي السنتمتر ، ذلك لأن مادة القمر شفافة للأمواج الراديوية نوعاً ما . نذكر هنا بأن الضجيج ناجم عن درجة الحرارة .

اما اذا سددنا المرصد نحو الشمس ، تتوقف اذ ذاك كمية الضجيج على التواتر الذي نضبط المرصد لاستقباله . فإذا كان ذلك التواتر حوالي ١٠ مليون هـ ف ث (يقابل طول موجة ٣٠ متر نحصل) على ضجيج يقابل درجة حرارة مساوية لمليون كالفن وهي درجة حرارة الهالة الرقيقة المحيطة بالشمس ، وهذه الهالة شفافة للأمواج الراديوية القصيرة ، كالغلاف الجوي الأرضي تماماً . وهكذا اذا ضبطنا المرصد على تواتر مقداره عشرة آلاف مليون هزة في الثانية نحصل على اشعاع يقابل درجة حرارة ٨٠٠٠ كالفن ، وهي درجة الحرارة السائدة فوق سطح الشمس بقليل . اما سبب ارتفاع درجة حرارة هالة الشمس بالنسبة لما تحتها ، فهو غير معروف تماماً .

يختلف الضجيج الراديوي السماوي باختلاف التواترات ، وعندما يصل التواتر المعتبر الى عدة آلاف ملايين الهزات في الثانية يقابل الضجيج عندئذ درجة حرارة ٣٫٥ كالفن اي حوالي - ٢٦٩٫٥ مئوية . أما عند التواترات الأدنى فالضجيج اكبر ويزداد باطراد كلما انخفض التواتر . تبث المجرات البعيدة على مختلف اصنافها ضجيجاً راديوياً . يحمل الاشعاع الكوني الخلفي ذو درجة الحرارة ٣٫٥ كالفن المذكورة ، تاريخ الكون بين طياته ، أما الأمواج الاخرى فلها تواترات متباينة وتأتي من امكنة مختلفة .

ومهما يكن من امر فعلينا تقبل ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري كحد أدنى لا سبيل للتخلص منه ، اما ما تفعله مصادر الضجيج الأخرى فهي انها تزيد الأمر سوءاً . ان الطبيعة الاساسية لضجيج جونسون جعلت منه معياراً في قياس حسن أداء أجهزة الاستقبال الراديوية .

يضيف جهاز الراديو ، كما رأينا ، ضجيجاً معيناً الى الاشارة التي يتلقاها ، وهو يضخم ايضاً اي ضجيج يصله نطرح الآن السؤال التالي : كم ضعفاً من ضجيج جونسون بدرجة حرارة مكافئة $د_{ن}$ نعتبرها مقياساً لضجيج جهاز الراديو ، وكلما كانت اصغر كان جهاز الراديو اجود .

نلقي فيما يلي بعض الضوء على درجة حرارة الضجيج $د_{ن}$ ، نتصور جهاز راديو مثالياً بدون ضجيج وله نفس المردود وعرض الحزمة كجهاز راديو فعلي ، ثم نرسل في هذا الجهاز المثالي ضجيج جونسون المقابل لدرجة الحرارة $د_{ن}$ بالاضافة الى الاشارة المستقبلة فيه . يترتب على ذلك ان نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج في هذا الجهاز المثالي ، المضاف اليه ضجيج جونسون ، هي نفسها لجهاز الراديو الفعلي .

اذن فدرجة حرارة الضجيج $د_{ن}$ هي مقياس جيد لضجيج جهاز الراديو . يستخدم في بعض الأحيان مقياس آخر يعتمد على $د_{ن}$ ويدعى رقم الضجيج ، ويعطى بالعلاقة :

$$ر ض = \frac{٢٩٣ + د_{ن}}{٢٩٣} = ١ + \frac{د_{ن}}{٩٢٣}$$

حيث ر ض هو رقم الضجيج المعرف .

إن تعريف رقم الضجيج هذا هو تعريف أرضي الطابع حيث تمتزج كل اشارة مع ضجيج مقابل لدرجة حرارة ٢٩٣ كالفن تقريباً . يساوي رقم الضجيج نسبة الخرج الكلي للضجيج ، بما في ذلك ضجيج جونسون المقابل لدرجة حرارة ٢٩٣ كالفن عند الدخل والضجيج المنتج من قبل الراديو ، الى ضجيج جونسون المضخم وحده .

تعتمد درجة حرارة الضجيج $د_{ن}$ لجهاز راديو على طبيعة وجودة ذلك الجهاز ، أما الحد الأصغري لرقم الضجيج فيعتمد على التواتر المستعمل . يبين الجدول التالي درجات حرارة الضجيج لبعض أنواع أجهزة الاستقبال .

نوع جهاز الاستقبال	درجة حرارة الضجيج ـ كالفن
راديو أو تلفزيون جيد	١٥٠٠
محطة استقبال ميزر لرحلات الفضاء	٢٠
جهاز استقبال مضخم	٥،٠

ان درجات الحرارة الفعلية لأجهزة الاستقبال الراديوية وكذلك درجات حرارة الأجسام التي نوجه نحوها هوائيات أجهزة الراديو تلك ، هي من الأهمية بمكان في نظرية الاتصالات ، لأن الضجيج يحدد الطاقة اللازمة للارسال . ان ضجيج جونسون هو من النوع الغاوسي الذي تنطبق عليه علاقة سبق أن عرضناها : وهي :

$$ص = س \text{ لع } \left(١ + \frac{ق}{ن} \right)$$

أي لارسال ص بيت في كل ثانية يجب ان نوفر للاشارة استطاعة ق ترتبط مع استطاعة الضجيج ن بهذه العلاقة . فإذا اعتمدنا الضجيج ن من العلاقة الثانية في هذا الفصل : ن = ث د س نحصل على :

$$ص = س \text{ لع } \left(١ + \frac{ق}{ث د س} \right)$$

نفرض استطاعة للاشارة ق معطاة . اذا صغرنا س تصغر ص بالمقابل ، أما اذا كبرنا س ، فإن ص لن تكبر الى ما لا نهاية ، بل ستكبر

مقتربة على الدوام من حد معين . وعندما يصبح الكسر (ق / ث د س) صغيراً جداً بالمقارنة مع الواحد نحصل على :

ص = ١ر٤٤ ق / ث د

اي ان ق = ٠ر٦٩٣ ث د ص

تؤكد هذه العلاقة الاخيرة انه حتى لو استخدمنا حزمة عريضة جداً فإننا سنحتاج على الأقل لطاقة قيمتها ٠ر٦٩٣ ث د جول في كل ثانية لارسال بيت في كل ثانية ، اي اننا يجب ان نستخدم بشكل وسطي طاقة مساوية ٠ر٦٩٣ ث د جول لكل بيت من المعلومات نود إرسالها . يجب أن نتذكر أن استنتاجنا لهذه العلاقة انطلق من فرض مثالي مفاده ان علينا اعتماد طريقة للترميز تضم عدداً كبيراً من الاحرف المثلة لكم معلوماتي غزير ثم ترمزها وفق اشارة مديدة . تحتاج معظم انظمة الاتصالات الفعلية كمية اكبر من الطاقة لكل بيت من المعلومات ، كما لاحظنا في الفصل التاسع .

ولكن ألم ننسَ شيئاً ما ؟ ماذا عن الآثار الكوانتية . ربما انها ليست ذات اهمية في الراديو ، ولكنها مهمة بشكل مؤكد في الاتصالات الضوئية ، وقد انفتحت أمام الضوء مجالات تطبيقية واسعة . تنقل الألياف البصرية الدقيقة الأصوات ومختلف الحمولات الأخرى كما تتيح ومضات الضوء المنعكسة عن المرايا القمرية متابعة تغيرات بعد القمر عن الارض بخطأ مقداره ١٠ سنتمترات ، وكان رواد الفضاء قد تركوا تلك المرايا على سطح القمر في رحلاتهم القمرية المتتالية .

كان هاري نيكويست رجلا مستقبليا . لقد صاغ ضجيج جونسون لعرض حزام قدره س وفق العلاقة :

$$ن = \frac{ب \times ت \times س}{e^{\frac{ب\,ت}{ث\,د}} - ١}$$

ومن ميزات هذه العلاقة إمكان تطبيقها على كل التواترات بما في ذلك الضوء . اما الكميات الواردة فيها فهي :

ن : طاقة الضجيج .   ت : التواتر مقدر بـ هـ ف ث

ب : ثابت بلانك ويساوي $٦٫٦٣ \times ١٠^{-٣٤}$ جول . ثانيـة

نربط عادة بين ثابت بلانك مع طاقة فوتون واحد للضوء بالعلاقة :

طاقة الفوتون = ب × ت

ث : ثابت بولتزمان .   د : درجة الحرارة مقدرة بمقياس كالفن .

س : عرض حزمة التواترات .

تصبح الآثار الكوانتية ذات أهمية عندما يصبح الجداء ب × ت مساوياً أو أكبر للجداء ث × د . وهكذا فالقيمة الحدية للتواتر التي تصبح علاقة نيكويست الاخيرة غير صالحة لقيم التواتر الأكبر منها هي :

$$ت = \frac{ث \times د}{ب} = ٢٫٠٧ \times ١٠^{١٠} \times د$$

عندما ناخذ الآثار الكوانتية بعين الاعتبار ، لا نجد ضجيجاً أكثر في التواترات العالية ، بينما نجد ضجيجاً قليلاجداً عندالتواترات الضوئية. إلا أن هناك قيوداً كوانتية غير تلك التي يفرضها الضجيج جونسون . ولكن يبقى المقدار ٠٫٦٩٣ ث د جول لكل بيت هو الحد العملي حتى في مجال

الضوء المرئي ويتعذر الوصول عملياً الى ذلك الحد في الاحوال الفعلية . هناك طريقة شائعة وغير صحيحة للاتصال ، وهي في واقع الامر أسوأ ، وتتلخص بتضخيم اشارة ضعيفة مستقبلة باستخدام مضخم جيد . إن هذا ممكن من الناحية النظرية ، ولكنه سيء لماذا ياترى ؟.

عندما تضخم نبضة ضعيفة عند تواترات منخفضة نحصل ببساطة على علىنبضة ذات استطاعة اكبر نستطيع قياس زمن صعودها الى ذروتها وطيف تواترها تعترض علاقة هايزنبرغ للريبة في الميكانيك الكوانتي ، إذ وفق هذه العلاقة لا نستطيع قياس الزمن والتواتر معاً وبدقة لا متناهية . إذا رمزنا للخطأ في قياس الوقت بالرمز Δ ز ، وللخطأ في قياس التواتر بالرمز Δت ، فإن أحسن ما يمكننا فعله متضمن في العلاقتين :

$$\Delta ز \times \Delta ت = ١$$

$$\Delta ز = \frac{١}{\Delta ت}$$

تنطوي هذه العلاقة على حقيقة مفادها اننا إذا اقتربنا من تواتر النبضة بدقة بالغة عن طريق تصغير Δت ، فإننا بالمقابل لن نستطيع تحديد لحظة وصول النبضة بدقة كافية . وبكلمات أوضح : لا نستطيع تحديد لحظة وصول نبضة طويلة ذات حزمة تواترات ضيقة بدقة كافية كما نفعل في حالة نبضة قصيرة ذات عرض كبير . ولكن كم نحن عاجزون عن محاولة إجراء مثل هذا القياس ؟

لنفرض اننا نضخم نبضة ضعيفة باستخدام أجود مضخم ممكن واننا نزيح كل تواتراتها حتى مجال ادنى تضعف عنده الآثار الكوانتية . نجد عند ذلك استطاعة الضجيج ن ممزوجة مع الإشارة المضخمة :

$$ن = ج\ ب\ ت\ س$$

حيث :

ت : هو تراتر الإشارة الأصلية العالية التواتر .

ج : هو الكسب الطاقي لنظام التضخيم والإزاحة .

س : عرض الحزمة يؤكد هذا الضجيج ، وفق قيمته المحسوبة هذه ، اننا لن نستطيع إجراء القياسات بدقة اكبر من تلك التي تسمح لنا بها علاقة هايزنبرغ للريبة .

يجب ان نزيد عرض الحزمة س بهدف زيادة دقة قياس الوقت ، إلا ان الضجيج الإضافي الذي يترتب على زيادة عرض الحزمة والمعطى بالعلاقة الاخيرة سينقص من دقة قياس الوقت التي وفرتها زيارة عرض الحزمة .

نستطيع باستخدام العلاقة الأخيرة واسلوب مناقشة قدمناه للتو، ان نصل الى استنتاج مفاده ان علينا استخدام طاقة لا تقل عن ٦٩٣ر. ب ت جول لكل بيت في ظل الآثار الكوانتية كي نستطيع تحقيق الإتصال بإشارة تواترها ت . تصلح هذه المناقشات لأنظمة الاتصالات التي نضخم فيها الإشارة المستقبلة باستخدام أجود المضخمات ، أي تلك المضخمات التي تضيف من الضجيج ما يكفي لإبعادنا عن تجاوز علاقة هايزنبرغ للريبة .

هل هناك بديل عن تضخيم الإشارة الضعيفة المستقبلة ؟

الإجابة نعم في حالة التواترات الضوئية . يمكن استخدام فوتونات الضوء لإنتاج نبضات كهربائية ضعيفة . تنتج بعض الأجهزة نبضات كهربائية قصيرة عندما تصلها فوتونات الضوء ؛ على الرغم من انها قد تفشل أحياناً بالاستجابة لبعض الفوتونات بشكل عشوائي ، من هذه الأجهزة الخلايا الكهرضوئية . ان المردود الكوانتي العملي لهذه الاجهزة اقل من ١٠٠ ٪ .

نستطيع من وجهة نظرية ، على الرغم من ذلك ، تحديد لحظة وصول فوتون ضوئي بتوجيه ذلك الفوتون لإنتاج نبضة كهربائية قصيرة . الا يمكن أن يخالف هذا مبدأ الريبة . كلا ، لأن قياسنا للحظة وصول الفوتون بهذه الطريقة سيحول دون معرفة بأي قدر مهما كان صغيراً لتواتر ذلك الفوتون .

تستخدم عدادات الفوتونات لتحديد لحظات وصول الومضات الضوئية المنعكسة عن المرايا التي تركها رواد الفضاء على سطح القمر ، كما تستعمل ايضاً في الاتصال بارسال الامواج الضوئية عبر الالياف البصرية . الا ان استخدامها لا يطابق الحالة النظرية الممكنة ، فهناك حد دون ذلك الاستخدام هو ٦٩٣ر. ث د جول لكل بيت ، وهو حد سبق واعترضنا . لا تغير الآثار الكوانتية هذا الاداء الحدي ، ولكنها تجعل من امكانية تحقيقه امراً مستحيلاً . ما هو السبب ؟

ان طاقة الفوتون هي : ب ت ، اما الطاقة النظرية لكل بيت فهي ٦٩٣ر. ث د ، وهكذا يمكننا ان نحسب كم بيت لكل فوتون من حاصل القسمة :

$$\frac{\text{ب ت}}{\text{٦٩٣ر. ث د}} \quad \text{اي :}$$

$$\text{١٫٤٤} \times \left(\frac{\text{ب ت}}{\text{ث د}}\right) \quad \text{بيت لكل فوتون}$$

كيف نستطيع ارسال طاقة مساوية لعدد من واحدات البيت بقياس لحظات وصول عدد قليل من الفوتونات أو لحظة وصول فوتون واحد . نفعل ذلك على النحو التالي : نبث من المصدر نبضة ضوئية خلال برهة من فترة زمنية طولها د مقسمة الى برهات عددها ل ، وعند المستقبل يلعب المجال الزمني الذي نتلقى الفوتون أثناءه دور موصل الرسالة .

سيسمح هذا في أحسن الاحوال من نقل ما مقداره لع ل بيت من المعلومات لكل فترة زمنية د. الا انا لن نتلقى اي فوتونات عند بعض اللحظات الزمنية ، بينما ستصل عند لحظات اخرى خاطئة فوتونات حرارية اي فوتونات ضجيج جونسون . ان هذا هو ما يجعل الارسال في حدود $\text{١٫٤٤} \times \left(\frac{\text{ب ت}}{\text{ث د}}\right)$ بيت لكل فوتون .

نستطيع في الواقع العملي ارسال عدد أقل من واحدات البيت لكل فوتون لانه من غير العملي أن نسعى الى انظمة فعالة بامكانها ارسال عدد كبير من واحدات البيت لكل فوتون .

توصلنا بتوحيد نظرية المعلومات والفيزياء الى قيمة الطاقة الدنيا اللازمة لنقل بيت واحدة من المعلومات ، وهي : ٦٩٣ر. ث د جول .

ان الضجيج الموجود بشكل فعلي في اجهزة الراديو المعاصرة أكبر من الضجيج المحيط لان المضخم يضيف ضجيجاً مقابلاً لدرجة حرارة اعلى من درجة حرارة المحيط . دعونا نستخدم درجة حرارة الضجيج $د_{ن}$ بدلاً من درجة حرارة الضجيج المثلة للضجيج المضاف فعلاً الى الاشارة كيف يمكننا ان نقارن الاداء الفعلي مع العلاقة النظرية :

$$ص = س لع (١ + \frac{ث د س}{ق})$$

اذا لم نلجأ الى تصحيح الاخطاء واكتفينا باستخدام قدر من طاقة الاشارة يكفي لتصبح الاخطاء في المعلومات المستقبلة قليلة الحدوث (بحدود خطأ واحد لكل ... ... ١٠٠ بيت مستقبلة) فان علينا استخدام طاقة لكل بيت تساوى عشرة أضعاف ماتعطيه العلاقة النظرية المذكورة .

ان اكثر انظمة الاتصالات تعقيداً هي تلك التي تستخدم لارسال المعلومات من المركبات المرتحلة في اعماق الفضاء . وهي عبارة عن اجهزة ميزر مستقبلة ذات ضجيج منخفض تتضمن الترميز وحل الترميز الالتفافي وفق مخطط فيتربي . استطاعت مركبة فويجير ارسال صور المشتري وتوابعه الى الارض ببث ١١٥٢٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية بنسبة خطأ ٥ر. ٪ واستخدام استطاعة قدرها ١٣ر٢١ واط ولا تزيد استطاعة الصوت الا بمقدار ٤ر٤ ديسيبل عن الحد المثالي الناجم عن عرض تواتري لا متناه في الكبر .

يبعد بلوتو حوالي ٦ × $١٠^{١٢}$ متر عن الارض . ما هي سرعة الارسال التي تستطيع مركبات الفضاء المرتحلة اليه تحقيقها . نفرض أن المصدر الوحيد للضجيج هو الفضاء الكوني ، ونهمل امتصاص الغلاف الجوي .

اذا استخدمنا هوائي ارسال مساحته الفعالة $ح_{ت}$ وهوائي استقبال مساحته الفعالة $ح_{ر}$ ، تصبح نسبة الاستطاعة المستقبلة الى الاستطاعة المرسلة وفق علاقة فريس للارسال مساوية :

$$\frac{ق_{ر}}{ق_{ت}} = \frac{ح_{ت} \times ح_{ر}}{و^{٢} \times ع^{٢}}$$

حيث و هو طول الموجة المستخدمة في الاتصال و ع هو البعد بين المرسل والمستقبل ويساوي في حالتنا ٦ × $١٠^{١٢}$ متر .

ننتقي بشكل اختياري مرسلاً استطاعته ١٠ واط . سنعتبر هنا حالتين . نستخدم في الحالة الاولى موجة طولها ١ سنتمتر أو ٠١ر٠ متر . يقابل طول الموجة هذا درجة حرارة للفضاء ، مساوية الى ٥ر٣ كالفن . نفرض ان مساحة هوائي الارسال ١٠ متر مربع وهو على شكل مربع ضلعه ١٦ر٣ متر ، بينما هوائي الاستقبال هو مربع آخر ضلعه ٦ر٣١ متر ومساحته ١٠٠٠ متر مربع . تبين العلاقة الاخيرة انه اذا كانت الاستطاعة المرسلة المستقبلية ٨ر٢ × $١٠^{-١٧}$ واط . اذا اعتبرنا الطاقة لكل بيت ٦٩٣ر. ث د حيث د = ٥ر٣ كالفن ، نستنتج أن اجهزة الارسال على المركبة الفضائية تستطيع ارسال ٨٠٠٠٠ بيت في كل ثانية ، وهي كمية ممتازة من المعلومات .

وماذا عن نظام الاتصال الضوئي نفرض ان طول الموجة ٦ × ١٠ $^{-٧}$ متر وهو يقابل تواتراً قدره ٥ × ١٠ ^{١٤} هـ ف ث ، وهذا هو الضوء المرئي . نفرض هوائيات اصغر (عدسات او مرايا) ؛ مثلاً الهوائي المرسل مربع ضلعه ١ متر ومساحته ١ متر مربع ، والهوائي المستقبل مربع آخر ضلعه ١٠ متر ومساحته ١٠٠ متر مربع . ونفرض هنا مرة اخرى ان استطاعة الارسال هي ١٠ واط . ان درجة الحرارة الضوئية للفضاء ، اي مجموع ضوء كل النجوم ، هي كمية غير معروفة تماماً وسنفرضها هنا ٣٥٠ كالفن . نحسب سعة ارسال مقدارها ٨٠٠ مليون الف بيت لقناتنا الضوئية .

اذا تلقينا ٨٠٠ الف مليون بيت في كل ثانية ، فيجب ان نتلقى ١٠٠ بيت لكل فوتون . يبدو من غير المحتمل تحقيق ذلك . ولكن حتى لو تلقينا بيت واحد لكل فوتون فسنستطيع استقبال ثمانية آلاف مليون بيت في كل ثانية . يبدو الاتصال الضوئي افضل طرق الاتصال عبر المسافات البعيدة في الفضاء .

ان اهم جوانب العلاقة بين نظرية المعلومات والفيزياء ، من منظور نظرية المعلومات ، هي التقييم الدقيق للقيود التي لا يمكن الخلاص منها والتي تفرضها قوانين الفيزياء على عمليات الاتصال . تتركز القيود بشكل رئيسي في ضجيج جونسون والآثار الكوانتية . إلا ان هناك قيوداً اخرى كاضطرابات الغلاف الجوي التي تشوه الاشارة بشكل مغاير لما تفعله اضافة الضجيج اليها . يمكن القاء الاضواء امثلة اخرى عن هذا النوع من العلاقة بين الفيزياء ونظرية المعلومات .

استغرقت الفيزيائيين فكرة ارتباط بين الفيزياء ونظرية الاتصالات مستقلة عن المسألة الاساسية التي اخذت نظرية الاتصالات على عاتقها مهمة حلها اي بامكانيات تقييد الترميز الفعال لدى بث المعلومات عبر قناة ذات ضجيج .

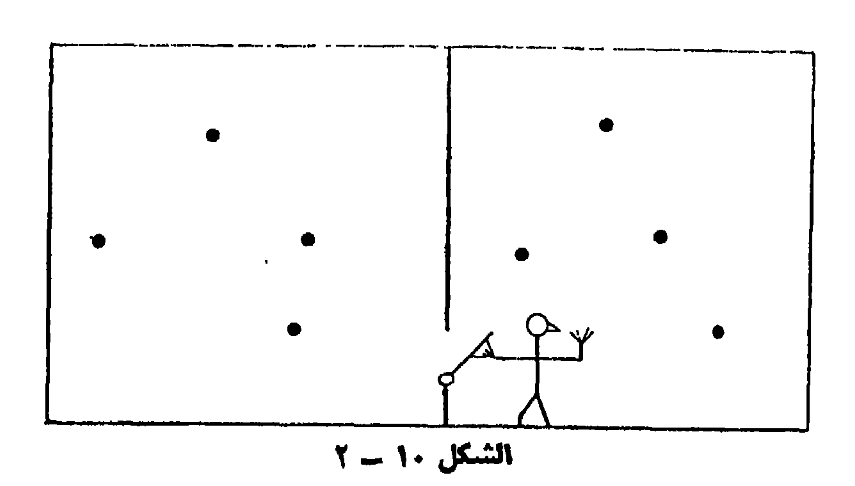
يقترح الفيزيائيون استخدام مفهــوم ارســال المعلومات ليبرهنــوا استحالة الآلة الدائمة الحركة من النوع الثاني . لقد سبقت هذه الفكرة ، في الواقع ، اختراع نظرية الاتصالات في ربها المعاصر ، فقد قدم زيلارد افكاراً مماثلة عام ١٩٢٩ .

تنتهي بعض الآلات الدائمة الحركة الى خلق الطاقة من لا شيء وهذا الفعل يخالف القانون الاول للترموديناميك ، اي قانون انحفاظ الطاقة . اما بعض الآلات الدائمة الحركــة الاخرى فتفضي الــى ترتيب للطاقــة الحرارية الموزعة اصلاً في المادة او الاشعاع بشكل فوضوي ضمن فرص ثبات درجة الحرارة ، كما في دوران دولاب الموازنة الذي يمكن استخدامه لادارة محرك قد يقوم بتبريد بعض الاجسام وتسخين بعضها الآخر وهكذا فبامكان هذا النوع من الحركة الدائمة نقل الطاقة من الاجسام الباردة الى الاجسام الساخنة دون استخدام طاقة منظمة اضافية .

ينص القانون الثاني للترموديناميك على استحالة نقل الحرارة من الاجسام الباردة الى الاجسام الساخنة بدون توظيف طاقة منظمة يمكن وضع هذا القانون في صيغة اخرى تقول : يستحيل تناقص الانتروبي الخاصة بأي نظام . وهكذا نرى ان الآلات الدائمة الحركة من النــوع الثاني تنتهك القانون الثاني للترموديناميك .

اخترع جيمس كلارك ماكسويل اكثر الآلات الدائمة الحركة من النوع الثاني شهرة . تستخدم هذه الآلة كائناً وهمياً هو شيطان ماكسويل . يوضح الشكل ١٠ ــ ٢ هذه الآلة .

يقطن هذا الشيطان علبة مقسومة وبامكانه تحريك باب بين القسمين عندما يشاهد جزيئاً سريعاً يتحرك جهة الباب من القسم الآخر ، يفتح الباب ويدع هذا الجزيء يدخل ناحيته ، وعندما يشاهد جزيئاً بطيئاً مندفعاً من جهته نحو الباب ، يسمح له بالمرور نحو الجانب الآخر . انه باختصار يمنع الجزئيات البطيئة من دخول قسمه والجزئيات السريعة



الشكل ١٠ ــ ٢

من مغادرته . وهكذا يتحول الغاز في قسمه بعد فترة الى مجموعة من الجزيئات السريعة ، اي الى غاز حار ، وعلى العكس يتحول الغاز في القسم الآخر الى مجموعة من الجزيئات البطيئة اي الى غاز بارد . ان شيطان ماكسويل يستطيع تحقيق انتقال الحرارة من القسم البارد الى القسم الحار . يبين الشكل ١٠ ــ ٢ هذا الشيطان وهو يحرك الباب كما يشاء بإحدى يديه ، بينما يدير انفه باليد الاخرى للقانون الثاني للترموديناميك .

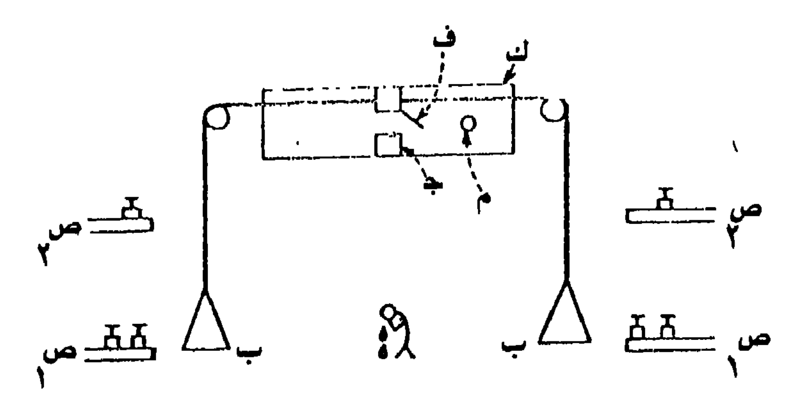
بقي شيطان ماكسويل محيراً لاولئك الفيزيائيين الذين لم يكتفوا بعدم الاكتراث به . نستطيع وضع اعتراض رئيسي ضده ، ينطوي هذا الاعتراض على ان بيئة الشيطان موجودة في حالة توازن حراري ، وان الضوء الوحيد الموجود هو الاشعاع الكهرطيسي العشوائي المقابل للضجيج الحراري ، وهو ضوء شديد التشويش لدرجة لا يستطيع معها الشيطان استخدامه لتمييز الجزيئات المندفعة نحو الباب .

يمكننا طرح بدائل اخرى لشيطان ماكسويل . ماذا لو وضعنا ، مثلاً ، باباً ذا نابض بين الحجرتين بحيث يمكن لجزيء متحرك الارتطام

به و فتحه اذا أتى من احدى الجهتين ولا يستطيع ذلك اذا اتى من الجهة الاخرى . الا ينتهي الامر الى تجمع كل الجزيئات بكل طاقتها في الجانب الذي ينفتح الباب في جهته .

يمكننا أن نضع الاعتراض التالي على الباب ذي النابض : اذا كان النابض قوياً فإن اي جزيء لن يكون بامكانه فتح الباب ، بينما اذا كان النابض ضعيفاً فإن الطاقة الحرارية ستجعل الباب في حالة خفقان دائم وسيبقى مفتوحاً في معظم الاوقات . كما أن الجزيئات ستنقل الطاقة الى الباب لدى فتحه . لقد اجمع الفيزيائيون على أن الاجهزة الميكانيكية المماثلة للباب ذي النابض او الدواليب المسننة الدقيقة لن تستطيع أن تنتهك القانون الثاني للترموديناميك .

ان مناقشة ماهو ممكن وماهوغير ممكن هي مناقشة بالغةالحساسية. لقد استطاع احد الاصدقاء خداعي بآلة اخترعها ، حتى تنبهت الى حقيقة ان أرى حيز مغلق في حالة توازن حراري يحتوي على جزيئات عشوائية واشعاع كهرطيسي عشوائي . الا ان هناك آلة واحدة بسيطة وهي على الرغم من كونها عديمة الاحتكاك ، مضحكة ، وغير عملية بالمعنى التطبيقي، فالارجح انها غير مستحيلة فيزيائياً بالمعنى الضيق الذي يستخدم الفيزيائيون به هذه العبارة . يوضح الشكل ١٠ ـ ٣ هذه الآلة .



الشكل ١٠ ـ ٣

تستخدم هذه الآلة اسطونة ك ومكبساً عديم الاحتكاك ح . عندما يتحرك ح الى اليمين أو اليسار يرفع احدى الكفتين ب ويخفض الاخرى يحتوي المكبس ح على فتحة ف يمكن فتحها واغلاقها . تحتوي الاسطوانة على جزيء واحد فقط هو م . تثبت درجة حرارة الآلة عند قيمة معينة د . سيثابر الجزيء م على فقدان وكسب الطاقة لدى ارتطامه بجدران الاسطوانة وستكون طاقته الوسطية متناسبة مع درجة الحرارة . اذا حركنا المكبس ببطء الى اليمين او اليسار وكانت الفتحة مغلقة ، لما لزم بذل اي عمل نبدأ والفتحة غير مغلقة ، نضبط المكبس في المركز من الآلة ونثبته ثم نغلق الفتحة . ندقق بعد ذلك لمعرفة الجانب من الاسطوانة الذي يتحرك ضمنه الجزيء ، ثم نضع وزن مقارنة ص١ على الكفة التي تقع في نفس جهة الاسطوانة الحاوية على الجزيء . نحرر المكبس . ماذا يحصل ؟ ان الارتطام المتكرر للجزيء على المكبس سيرفع في النهاية الكفة الحاوية على وزن المقارنة ص١ نفتح بعد ذلك الفتحة ، ثم نضبط المكبس في المركز من الآلة ونكرر العملية . تتلخص نتيجة عملنا باننا استطعنا رفع عدد كبير من اوزان المقارنة الى الاعلى ، وبكلمة اوضح انجزنا عملا منظماً باستخدام طاقة حرارية غير منظمة .

كم هي قيمة العمل الذي بذلناه ؟ يمكننا ان نبرهن على ان القيمة الوسطية للقوة التي يدفع بها الجزيء المكبس هي :

$$ق = \frac{ث\ د}{ل}$$

حيث ل هو البعد بين المكبس وطرف الاسطوانة في الجهة التي يتحرك ضمنها الجزئي . عندما نسمح للجزيء بدفع المكبس وسوقه ببطء الى نهاية الاسطوانة بحيث تتضاعف المسافة ، فان اكبر قيمة للعمل الذي يبذله الجزيء هو : س = ٦٩٣ر٠ ث د

واقع الامر ان العمل المبذول لرفع وزن ثابت سيكون اقل من ذلك ، فالعلاقة الاخيرة تمثل الحد الاعلى ، ولكن هل حصلنا على ذلك بدون مقابل ؟

ليس تماماً ، فعندما ضبطنا المكبس في المركز واغلقنا الفتحة نجد انفسنا امام احتمالين متساويين يتعلق بوجود الجزئي في احدى جهتي الاسطوانة . يلزمنا كم معلوماتي يساوي بيت واحدة كي نستطيع اتخاذ القرار المناسب حول الكفة التي سنضع عليها وزن المقارنة وتصلنا هذه المعلومة ضمن نظام درجة حرارته د . ما هي القيمة الدنيا للطاقة اللازمة لارسال بيت واحدة من المعلومات في درجة حرارة د . لقد حسبنا هذه القيمة للتو ، انها تساوي بالضبط ٦٩٣ر. ث د جول ، تساوي هذه القيمة الاخيرة الحد الاعظمي للطاقة التي يمكن للآلة ان تولدها . ينطبق هذا من حيث المبدأ على الحالة الكوانتية ، اذا فعلنا اكثر ما هو ممكن وهكذا نستخدم كل خرج الآلة لبث المعلومات الضرورية لاستمرار عمل هذه الآلة .

ان من العبث ان نناقش ما هو فعلي وممكن تحقيقه في مقابل المردود المحدود لمثل هذه الآلة ، اذ انه وفي احسن الاحوال سنخرج من التجربة دون ربح او خسارة .

لقد بينا الآن من خلال حالة بسيطة أن ارسال المعلومات وفق نهج نظرية الاتصالات يمكننا من تحويل الطاقة الحرارية الى طاقة مكانيكية . ان واحدة البيت التي تقيس كمية المعلومات المستخدمة هي نفسها الواحدة التي نقدر بموجبها انتروبي مصدر رسائل في نظرية الاتصالات . اما انتروبي الترموديناميك فتقرر اي جزء من الطاقة الحرارية يمكن تحويله الى طاقة ميكانيكية . يبدو طبيعياً ان نحاول ربط انتروبي الترموديناميك والميكانيك الاحصائي بانتروبي نظرية الاتصالات .

ان انتروبي نظرية الاتصالات هي قياس الريبة فيما يتعلق باي رسالة من ضمن مجموعة ممكنة من الرسائل سيقوم مصدر الرسائل بتوليدها فعلا في ظرف معين . اذا اختار المصدر رسالة من بين عدد م من الرسائل المتساوية الاحتمال ، تكون الانتروبي مقدرة بالبيت لكل رسالة مساوية للوغاريتم م من الاساس ٢ . يتضح أنه يمكن بث الرسائل

في هذه الحالة باستخدام عدد من الارقام الثنائية لكل رسالة مساو لـ لع م . تبرز اهمية انتروبي نظرية الاتصالات بشكل عام ، من كونها تقيس مباشرة العدد الوسطي للارقام الثنائية اللازمة لبث الرسائل التي يولدها مصدر رسائل معينة .

اما انتروبي الميكانيك الاحصائي فتقيس الريبة المتعلقة بالحالة التي يمكن ان تكون فيها جملة فيزيائية . يفترض في الميكانيك الاحصائي ان كل الحالات الممكنة ، المقابلة لطاقة معينة ، متساوية الاحتمال . تساوي انتروبي الميكانيك الاحصائي جداء ثابت بولتزمان في لوغاريتم عدد الحالات الممكنة ماخوذة بالنسبة للعدد النابيري e . ولهذه الانتروبي اهمية عظيمة في الميكانيك الاحصائي . ومن العلاقات الهامة ، تلك التي تعطي الطاقة الحرة :

ط ح = ط ــ ت × د

حيث ط ح الطاقة الحرة ، ط الطاقة الكلية ، ت الانتروبي ، د درجة الحرارة . ان الطاقة الحرة بالتعريف ، هي ذلك الجزء من الطاقة الكلية الذي يمكن ان يحول الى طاقة منظمة كطاقة جسم مرفوع .

ان فهم انتروبي الميكانيك الاحصائي يقودنا الى الحديث عن الجمل الفيزيائية جسما صلباً متبلورا او حيزاً مغلقاً يحتوي على كمية من الماء والبخار او زجاجة مليئة بالغاز ، او اي مادة او مجموعة من المواد . سنعتبر مثل هذه الجملة في حالة توازنها اي حالة استقرارها عند درجة حرارة معينة وعند الحد الذي تكون فيه كل انتفاعلات الفيزيائية والكيميائية الممكنة الحدوث قد اخذت عنده مداها .

نعتبر كمثال على الجمل الفيزيائية حالة غاز مكون من جسيمات لا متناهية الصغر تتطاير في كل اتجاه داخل وعاء حاو للغاز .

ان حالة هذه الجملة هي توصيف كامل ، او توصيف كامل بقدر ما نسمح قوانين الفيزياء ، لكل مواقع وسرع هذه الجسيمات فوفق الميكانيك الكلاسيكي اي قوانين نيوتن في الحركة يكون لكل جسيم سرعته وطاقته وهكذا فهناك عدد مستمر لا نهاية له من الحالات ، كما أن هناك عددا لا نهاية له من النقاط واقعة على مستقيم او داخل مربع اما التناول الكوانتي لهذه الجملة فيصفها بعدد منفصل وغير مستمر وغير منته من الحالات . وهكذا يتشابه المنظور الكلاسيكي للمسالة مع مشكلة الاشارات المستمرة المعقدة في نظرية الاتصالات ، بينما يقابل التناول الكوانتي حالة الاشارات المنفصلة المكونة من رموز منفصلة مختلفة . ولقد تناولنا الحالة الأخيرة باسهاب في هذا الكتاب .

يحدد الميكانيك الكوانتي عددا معينا من سويات الطاقة يمكن لجزيء من غاز مثالي ان يحتل احدها ، ويقا لعندها أن لهذا الجزيء سوية طاقية معينة كم ستكون انتروبي ذلك الغاز . اذا زدنا حجم الغاز فان ذلك ينعكس بزيادة في عدد سويات الطاقة المختلفة ضمن نفس مجال الطاقة السابق . ان هذا يزيد عدد الحالات التي يمكن للجملة أن تتخذها وبالتالي تزداد الانتروبي . يحدث مثل هذا الازدياد في الانتروبي اذا سمحنا لكمية من الغاز حبيسة في حيز معين ان تتمدد فجاة لتملأ حيزاً اكبر .

اذا زدنا درجة حرارة غاز مع المحافظة على حجمه احتلت جزيئاته سويات طاقة أعلى ، واصبح بالامكان دمج سوياتمختلف من الطاقة لتكوين سويات جديدة باختصار يزيد عدد سويات الطاقة وتزيد الانتروبي تبعاً لذلك .

اذا تحدد غاز بجوار مكبس بطيء الحركة ، ولم تضف اي كمية من الحرارة الى الغاز ، تزداد السويات المختلفة في مجال معين للطاقة ، الا ان درجة الحرارة تهبط بحيث يبقى العدد الاجمالي لسويات الطاقة والانتروبي دون تغيير .

نستنتج اذن ، انه من اجل نفس درجة الحرارة ، تكون انتروبي الغاز المتجمع في حيز صغير اقل من انتروبي نفس الغاز عندما يشغل حجماً اكبر . ينطبق هذا على حالة الغاز المكون من جزيء واحد في الشكل ١٠ ــ ٣ ، اذ تكون الانتروبي اقـل عندما تكون الفتحة مغلقة والجزيء حبيس في احد جانبي الاسطوانة ستكون الانتروبي ، اقل ، في الحد الادنى عندما نعلم في اي من جهتي الاسطوانة يسبح الجزيء .

نستطيع بسهولة حساب نقصان الانتروبي الناجم عن خفض حجم غاز مكون من جزئي واحد الى النصف مع الحفاظ على درجة حرارته . يفضي خفض الحجم هذا الى انقاص عدد حالات الغاز وتنقص الانتروبي تبعا لذلك بالمقدار التالي :

ث لع$_{e}$ ½ = — ٦٩٣ر. ث

اما التغير المقابل في الطاقة الحرة فهو يساوي نظير حاصل ضرب تغير الانتروبي في درجة الحرارة اي : ٦٩٣ر. ث د

يساوي هذا التغير ، وفق ما تقدم، العمل الذي نحصل عليه بتصنيف حجم الغاز المكون من جزيء واحد ومن ثم السماح له بالتمدد ودفع المكبس حتى يعود الى حجمه الاصلي . وهكذا فحساب الطاقة الحرة يفضي الى هذه العلاقة .

نستذكر انه في حالة الغاز ذي الجزئي الواحد تلزمنا كمية من المعلومات تساوي بيت واحدة لمعرفة موقع الجزيء ويجب ان نبث هذه المعلومة على خلفية من الضجيج تقابل درجة حرارة د ، وهذا بدوره يقتضي توفر ٦٩٣ر. ث د جول من الطاقة .

عندما نعلم الآن ان الجزيء موجود في جهة معينة من المكبس ، فان الانتروبي تصبح اقل بـ ٦٩٣ر. ث د مما لو كنا غير واثقين من الجهة التي يوجد فيها هذا الجزيء .. يقابل هذا الانخفاض في الانتروبي ازدياد في

الطاقة الحرة مقدرة ٦٩٣ر. ث د جول . نستطيع أن تحول هذه الطاقة الحرة الى عمل بالسماح للمكبس بالحركة نحو قسم الاسطوانة غير المشغول حينما يدفعه الجزيء عبر اصطدامات متتالية بسطحه . ترتفع عند هذه النقطة الانتروبي الى قيمتها الاصلية وتكون قد حصلنا من الجملة على كمية من الطاقة ، الا ان هذه الطاقة تساوي مع الاسف الحد الادنى للطاقة اللازمة لبث المعلومات التي ابلغتنا عن الجهة التي يسبح الجزيء فيها .

نعتبر الآن حالة اكثر تعقيدا . نفرض أن الجملة فيزيائية معينة عددا من الحالات م في درجة حرارة ثابتة واننا جزانا هذه الحالات الى زمر تحتوي كل منها على $\frac{م}{ن}$ حالة ، اي ان عدد الزمر هو ن .

نبحث الآن عن الخصائص المرتبطة بانتماء الحالة التي تكون عليها الجملة الى احدى هذه الزمر . ان انتروبي المصدر وفق نظرية الاتصالات هي لع ن بيت ، ذلك لان هناك ن زمرة من الحالات متساوية الاحتمال . يعني ذلك انه لتحديد الزمرة التي تقع فيها حالة الجملة الفيزيائية يلزم توظيف ن رقم ثنائي . اما بث هذه المعلومات في درجة حرارة د ، فيتطلب الطاقــة :

$$\text{٦٩٣ر. ث د لع ن = ث د لع}_e\text{ ن جول}$$

اي ان الطاقة اللازمة لبث الرسالة تتناسب مع انتروبي مصدر الرسائل وفق نظرية الاتصالات .

اذا علمنــا أن الجملة موجودة في إحــدى حالاتها ذات العدد م ، تكون الانتروبية : ث لع$_e$ م .

اما في حالة معرفتنا الاكيدة بأن الجملة في حالة تنتمي لزمرة معينة من الزمر التي تحتوي كل منها على $\frac{م}{ن}$ من الحالات ، تكون الانتروبي :

$$\text{ث لع}_e \frac{م}{ن} = \text{ث (لع}_e\text{ م - لع}_e\text{ ن)}$$

وهذا يشابه حالة ما بعد الارسال حين نعتبر في أي من الحالات تكون الجملة .

أن تغير الانتروبي الناجم عن المعلومات المتعلقة بتحديد الزمرة التي تنتمي اليها حالة الجملة هو : ــ ث لع$_{e}$ ن .

والزيادة المقابلة في الطاقة الحرة تساوي ث د لع$_{e}$ ن .

يساوي هذا الطاقة الدنيا اللازمة لبث المعلومات المتعلقة بتحديد الزمرة التي تنتمي اليها حالة الجملة ، وهي المعلومات التي قادت الى إنقاص الانتروبي وزيادة القدرة الحرة .

نعتبر كمصدر رسائل اي عملية بإمكانها ان تفضي الى اي معطى يتعلق بالحالة التي قد تكون جملة ما قد اتخذتها . يولد هذا المصدر رسالة تخفض ريبتنا حول حالة الجملة المذكورة . ان لهذا المصدر ، وفق نظرية الاتصالات ، انتروبي لكل رسالة . تساوي هذه الانتروبي عدد الأرقام الثنائية اللازمة لبث الرسالة التي يولدها المصدر . ويلزم كمية معينة من الطاقة لارسال كل رقم ثنائي من الرسالة على خلفية من الضجيج تقال درجة حرارة د .

تخفض الرسالة ريبتنا فيما يتعلق بالحالة التي اتخذتها الجملة ، وهكذا تخفض أيضاً انتروبي الجملة وفق الميكانيك الاحصائي ، وهــذا التخفيض يزيد بدوره الطاقة الحرة للجملة ، الا أن هذا الازدياد يساوي القيمة الصغرى للطاقة اللازمة لبث الرسالة التي ادت ازدياد الطاقة الحرة ، وهي طاقة متناسبة مع انتروبي نظرية الاتصالات :

اعتقد ان هــذه العلاقة هي العلاقة المنشودة بين انتروبي نظرية الاتصالات وانتروبي الميكانيك الاحصائي . وهكذا علينا دفع ثمن مــا للمعلومات التي تقود الى تخفيض انتروبي الميكانيك الاحصائي للجملة . يتناسب هذا الثمن مع انتروبي نظرية الاتصالات لمصدر الرسائل الذي يولد المعلومات . يجب أن يكون هذا الثمن مرتفعاً بما فيه الكفاية لكي تكون الآلة الدائمة الحركة من النوع الثاني مستحيلة .

يجب ان نلاحظ على كل حال ان مصدر الرسائل الذي يولد رسائل تتعلق بالحالة التي تكون عليها جملة فيزيائية ما ، هو مصدر خاص ومن نوع متفرد . تعتبر النصوص اللغوية المكتوبة او المنطوقة من اكثر المصادر شيوعاً ، الا انه لا يهمنا على الاطلاق ان نربط اية انتروبي خاصة بها بانتروبي فيزيائية الطابع ، اللهم الا من خلال الطاقة اللازمة لبث بيت واحدة من المعلومات في ظل ظروف مثالية للغاية .

تفضي معالجاتنا السابقة الى ما هو غريب نوعاً ما ، فالطاقة التي نبذلها لبث المعلومات عن حالة جملة فيزيائية معينة تحول بيننا وبين معرفة الماضي بشكل مفصل . واذا لم يكن بإمكاننا معرفة الماضي بشكل كامل ، فهل نعلن أن ذاك الماضي فريد زمانه ؟ وهل هذا السؤال معقول حقاً ؟

اوجزنا في هذا الفصل بعض المشاكل المتعلقة بالاتصال كهربائياً في عالمنا الفيزيائي الواقعي . راينا كيف ان بعض الظواهر الفيزيائية كالبروق والصواعق واجهزة إقلاع السيارات تنتج تشويشات كهربائية او ضجيجاً يضاف الى الاشارات الكهربائية التي نستخدمها لبث الرسائل . يسبب هذا الضجيج اخطاء في الارسال كما يحدد من سرعة بث المعلومات عند استخدام طاقة وحزمة تواترات معنيتين للاشارة .

ان الضجيج الصادر عن الأجسام الحارة هو ضجيج شامل بسيط ولا يمكن تجنبه وهو لذلك هام للغاية في كل أنواع الاتصالات . نشير هنا الى أن كل جسم في الكون هو في نهاية المطاف جسم حار اذا كانت حرارته اعلى من الصفر المطلق . تظهر عند التواترات العالية الآثار الكوانتية وكذلك ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري ، ولقد راينا تاثيرها في الحالة الحدية لحزمة لا نهائية العرض ، الا أنه مع ذلك لا يوجد مقابل كوانتي للعلاقة :

$$\text{ص} = \text{س لع} \left(1 + \frac{\text{ق}}{\text{ث د س}} \right)$$

ادى استخدام مصطلح الانتروبي في الفيزياء ونظرية الاتصالات على حد سواء الى التساؤل عن امكانية وجود علاقة بين هذين الوجهين للانتروبي . يمكن ان نبرهن في حالة بسيطة ان القيود المفروضة على ارسال المعلومات من قبل الضجيج الحراري تحول دون تصميم آلة يمكنها تحويل الطاقة الحرارية العشوائية الى طاقة منظمة لثقل مرفوع ، اذ أن نجاح مثل هذه الآلة سيخرق القانون الثاني للترموديناميك . دعونا نعتبر أن بحثنا يتناول الحالة التي يمكن ان تكون عليها جملة فيزيائية معينة . كمصدر للرسائل . تساوي انتروبي هذا المصدر وفق نظرية المعلومات القدرة اللازمة لبث رسالة من المصدر على خلفية من الضجيج الحراري الموجود حتماً في الجملة المعتبرة . إن الطاقة المستخدمة لبث مثل هذه الرسالة تساوي الازدياد في الطاقة الحرة الناجم عن الانخفاض في الانتروبي الفيزيائية الناجم بدوره عن الرسالة .



الفصل الحادي عشر

السيبرنيتيك

تملك بعض الكلمات مزايا خاصة فمنها ما يثير مشاعر الرعب ، أو الإحساس بالغموض ، أو النشوة الشاعرية ، فلقد وصفت الممثلة دوروثي لامور بانها (غريبة ودخيلة) وهي ترتدي الساورنغ (اللباس الوطني في الملايو) . ولئن كنت لا أعلم بالضبط المعنى العام لهذه الصفة عند الناس ، إلا انني واثق بأن كلمة أجنبي (وهي المعنى الاصلي لكلمة exotic التي ترجمناها بالغريب أو الدخيل) شاحبة المدلول أمام ذلك المعنى الشائع . كما أن كلمة (الرّق) تجعلني افكر بالمجلدات المفقودة التي كانت تحوي أسرار سليمان أو سواها من العقائد السرية ؛ رغم أنني أعلم أن هذه الكلمة لا تعني أكثر من مخطوط امحت كلماته لتفسح المجال لكتابة جديدة .

ونصادف احياناً كلمات أو عبارات لا ترتبط بمعنى محدد وواضح وتحافظ خلال فترات استعمالها على سمتها السحرية البعيدة كل البعد عن أي تفسير دارج . فعبارتا (الناموس الاعظم) و (النزوة الحيوية) وكلمة (العزيزة) تمثل فيما ارى نماذج منها . لكنني لا أعتقد أن كلمة السيبرنيتيك تنتمي تماماً الى هذا النوع من الكلمات وان كانت ذات نوعية محيرة وعبير شاعري .

يعرف وينر السيبرنيتيك بانـه علم التحكم والاتصال في الكائنات الحية وفي الآلات وقد اقتبس الكلمة من المرادف اليوناني لمدلول موجه دفة

السفينة . لقد ظفر علم السيبيرنيتيك بشهرة واسعة منذ نشر كتاب وينر حوله عام ١٩٤٨ . وإذا قبلنا بوجود علم السيبيرنيتيك فيجب أن يكون هناك من يمارسه ، وهكذا ولد مصطلح عالم السيبيرنيتيك للدلالة على الشخص المتخصص في السيبيرنيتيك .

ما هو علم السيبيرنيتيك ؟ إذا استشرنا كتاب وينر لوجدنا أن هذا العلم يضم على الأقل نظرية المعلومات التي أصبحنا الآن ملمين بها وبقدر كاف . إنه شيء يمكن أن نسميه نظرية في الصقل والتصفية والكشف والتنبؤ ، نظريــة تهتم بالبحث عن الموجــود في الحاضر وتتنبأ بالقيــم والإشارات المستقبلية المصحوبة عادة بشيء من الضجيج وأخيراً نظرية في الآلية المؤازرة والتغذية الراجعة السلبية التي اقتفى وينر أثرها حتى وصل لكتاب ألفــه جيمس كلارك ماكسويل ، نشره عام ١٨٦٨ وتناول فيه موضوع المنظم (وهو الجهاز الذي يحافظ على سرعة ثابتة للآلــة البخارية) . يجب أن نضيف ، على ما أعتقد ، علماً آخر هو علم الأتمتة والآليات المعقدة وهذا يتضمن تعميم وبرمجة أجهزة الكومبيوتر .

ويجب ألاّ ننسى كل ظواهر الحياة التي تشبه بشكل أو بآخر كل أو بعض ما أتينا على ذكره . وأن نضمها تحت لواء السيبيرنيتيك ، وهنا تقفز الى الذهن أمثلة عن بعض الوظائف السلوكية والتنظيمية للجسم ، إلاّ أن وينر يذهب الى أبعد من ذلك ، ففي كتابه « أنا عالم رياضيات » يذكر أن عالم الاجتماع وعلم أصل الإنسان هما علمان أساسيان للاتصالات ، لذا يندرجان في قائمة اهتمامات السيبيرنيتيك . ثم يستطرد ليقول إن علم الاقتصاد أيضا يقع دائرة السيبرنيتيك سيما انه احد فروع علم الاجتمــاع .

لا نستطيع التشكيك بمصداقية وينر إزاء كل ما قدمناه إلاّ بصعوبة . لقد كان رأياً واضحاً فيما يتعلق بالتناول الإحصائي لعالم الحياة والفكر ؛ فبالنسبة له تحول تيــار البحث الصاعد ، عبر ماكســويل وبولتزمان وجيبس ، الى قاعدة فلسفية عريضة لديه ضمنها أيضاً أخلاقيــات كيرغــارد .

تكمن المشكلة في أن كل منهج من المناهج العديدة التي وضعها وينر في بوتقة السيبرنيتيك له اغراضه ومجاله الخاص . ويقتضي الأمر استخدام آلاف الكلمات لشرح تاريخ ومضمون ومنظور كل منها . لذا فان دمجها معاً يعني الحصول على تشكيل متباعد وغير متجانس سواء من حيث الكم أو الاهمية ، وهو لهذا أيضاً غير جذاب .

يتبين لنا مما تقدم سبب قلة عدد علماء السيبرنيتيك . وإذا اجرينا استفتاء بين جمهور العلماء عن فحوى اختصاصاتهم لأجابت نسبة ضئيلة منهم « حقل السيبرنيتيك » . لو اعتبرنا من بين هؤلاء العلماء إخصائيا في الاتصالات ، او الآلات الاوتوماتيكية المعقدة مثل اجهزة الكومبيوتر ، او علم النفس التجريبي ، أو علم وظائف الجملة العصبية ، واعدنا عليه سؤالنا بالحاح « هل تعمل في حقل السيبرنيتيك » ، لتأمل فينا طويلا محاولا فهم خلفياتنا واهدافنا العلمية ، وإذا قرر اننا مجرد اناس غير متخصصين نحاول فهم ما يجري لا اكثر ، لأجابنا عندها باقتضاب : نعم .

ما زالت كلمة السيبرنيتيك حتى الآن تحتل عناوين الصحف والمجلات غير المتخصصة ، إن لم نقل المجلات التي لا علاقة لها بالعلم على الإطلاق ، وربما ان بامكان هذه المجلات الإفاضة في امتداح السيبرنيتيك وتبيان مزاياه باكثر مما يستطيعه العالم . وأؤكد في هذا المعرض الاهمية المستمرة لكتاب وينر « أنا عالم رياضيات » خاصة فيما يتعلق بأسس السيبرنيتيك يضم السيبرنيتيك ، كما قدمت ، حقولا من المعرفة متنوعة ، وإن اضيقها هو في حقيقية الامر واسع بحد ذاته لدرجة لا اجرؤ معها على الإسهاب بشرحه في كتاب واحد ، حتى لو بلغ حجمه اضعاف هذا الكتاب .

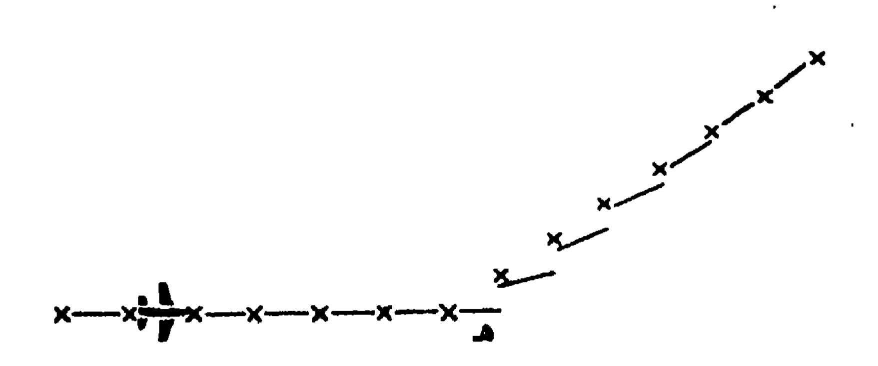
سأقتصر في هذا الفصل على محاولة عرض افكار بسيطة تتعلق ببعض القضايا التكنيكية التي تتبادر الى الذهن عند ذكر كلمة السيبرنيتيك . لن يكون هذا الموجز بدون فائدة ، إذ سيتمكن القارىء بفضله من كشف اهتماماته الشخصية إزاء السيبرنيتيك ، وإذا تبين انه مهتم فعلا ،

فسيضيف الموجز فائدة اخرى هي التعريف بنوعية المعلومات التي يتوجب على القارىء السنعي ورائها لإرضاء اهتمامه .

نبدا بالمركبة الاولى لعلم السيبرنيتيك والتي دعوتها نظرية التنبؤ وهي ذات اهمية بالغة بحد ذاتها . إن هذه النظرية في واقع الامر هي نظرية رياضية محضة ، إلاّ اننا نستطيع أن نجلو بعض قضاياها بمثال عملي .

نفرض اننا امام مشكلة استخدام معلومات رادارته نبغي بواسطتها تسديد مدفع مضاد للطائرات بهدف إسقاط طائرة معادية . يعطينا الرادار سلسلة من قياسات يحدد كل منها موقع الطائرة بخطأ طفيف . يتوجب علينا ان نستخرج من هذه المعلومات مسار وسرعة الطائرة مما يمكننا من التنبؤ بمواقعها في فترات لاحقة ، ومن ثم إطلاق قذيفة مناسبة الى احد تلك المواقع وإسقاط الطائرة بالتالي .

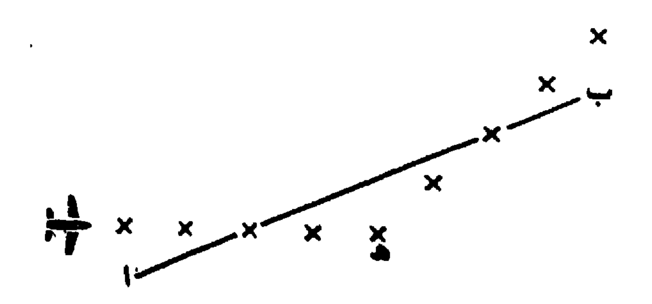
نفرض ثبات سرعة وارتفاع الطائرة . يوضح الشكل ١١ ـ ١ المعلومات الرادارية عن المواقع المتتالية للطائرة بإشارة x . نستطيع أن نرسم خطاً بالنظر آ ب يمكن أن يكون حزراً معقولاً لمسار الطائرة كيف نستطيع تعليم الآلة لتقديم مثل هذا التنبؤ ؟



الشكل ١١ ـ ١

إذا طلبنا من الكومبيوتر أن يستخدم المعلومة الاخيرة ل ، والمعلومة السابقة لها مباشرة ن ل ، لرسم الكومبيوتر قطعة مستقيمة عبر هاتين النقطتين طبعاً هذا الإجراء خاطىء ، وعلى الكومبيوتر استخدام المعلومات السابقة أيضاً .

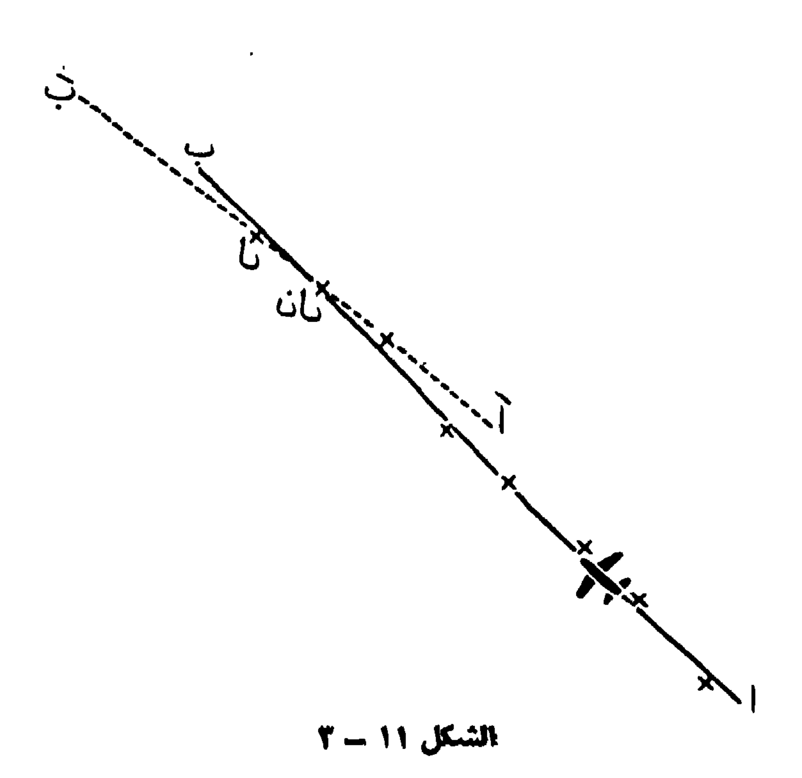
تتجسد أبسط أساليب التبادل بالنسبة الكومبيوتر في اعتبار كل النقاط واعطاء أوزان متساوية لها . إذا تصرف الكومبيوتر بهذه الطريقة وحاول ملائمة خط مستقيم لكل النقاط مأخوذة دفعة واحدة ، يحصل ربما على نتيجة كتلك الموضحة في الشكل ١١ ــ ٢ ، حيث قامت الطائرة بانعطاف عند النقطة هـ ، لذا فالمسار آ ب الذي حدده الكومبيوتر لا علاقة له بمسار الطائرة من وجهة النظر العملية .



الشكل ١١ ــ ٢

نستطيع معالجة هذه المشكلة بإعطاء اهمية أكبر للمعلومات الحديثة بالمقارنة مع المعلومات السابقة . وابسط طرق تطبيق هذه الفكرة هي طريقة التنبؤ الخطي . يعالج الكومبيوتر في التنبؤ الخطي كل معلومة على حدة ، (والمعلومة هنا قد تكون بعد وجهة الطائرة بالنسبة لموقع الرادار) حيث يضرب كل معلومة بعدد يتوقف على حداثة هذه المعلومة ، إذ سيكون هذا العددأكبر كلما كانت المعلومة احدث . يجمع الكومبيوتر بعد ذلك كل هذه الجداءات وينتج بذلك نبؤة على هيئة معلومة جديدة ، مثلا بعد وجهة الطائرة بالنسبة للرادار عند لحظة لاحقة .

يمكن ان تكون نتيجة هذا التنبؤ وفق ما هو مرسوم في الشكل ١١ــ٣



الشكل ١١ ــ ٣

لقد تم هنا استخدام التنبؤ الخطي لحساب موقع وجهة متقدمين للطائرة كلما توفرت معلومة رادارية جديدة ممثلة في الشكل بإشارة × . وهكذا فمسار الطائرة المحسوب هو خط مستقيم ينطلق من الموقع المحسوب وفق الاتجاه المحسوب ، ويبقى هذا المسار معتمداً حتى ورود معلومة رادارية جديدة . نلاحظ ان الكومبيوتر يأخذ وقتاً طويلا حتى يدخل في اعتباره حقيقة انعطاف الطائرة عند النقطة هـ ، رغم أننا ادركنا هذا الامر مباشرة عند رؤيتنا الموقع الذي يلي النقطة هـ .

يستخدم التنبؤ الخطي المعلومات السابقة بكفاءة عالية ، إلا ان استجابته للمعلومات الجديدة تتسم بكونها استجابة بطيئة ، علماً بأن

هذه المعلومات ليست على اتساق مع سابقتها ، كالمعلومات التي حصلنا عليها في حالة الطائرة بعد انعطافها عند النقطة هـ . إذا حاولنا زيادة سرعة استجابة التنبؤ الخطي للمعلومات الجديدة ، فسننجح في ذلك ، إلاّ اننا سنقع في مطب آخر ، فالتنبؤ الخطي إذ ذاك لن يستخدم المعلومات القديمة بالكفاءة المطلوبة حتى لو كانت متسقة مع المعلومات الجديدة .

ان تحقيق التنبؤ الجيد حتى في حالة تبدل الظروف ، كما حدث عند انعطاف الطائرة ، يتم باستخدام التنبؤ غير الخطي ، وهذا النوع من التنبؤ يعتمد كل أساليب التنبؤ وليس فقط على ضرب المعلومة بعدد يتناسب مع قدمها ثم جمع الجداءات .

نورد فيما يلي مثالا بسيطاً عن التنبؤ غير الخطي . نفرض ان لدينا متنبئين خطيين مختلفين ، يأخذ الاول بعين الاعتبار آخر مجموعة من المعلومات ثم تلقيها في حدود ١٠٠ معلومة ، بينما يعتبر الثاني العشرة الاخيرة من المعلومات فقط . نفرض اننا سنستخدم كل متنبىء على حدة لحساب ما ستكون عليه المعلومة التالية التي سترد ، ثم نقارن المعلومة الواردة فعلا بكلا التنبؤين . نصوغ معياراً للاختيار بين المتنبئين وفق ما يلي . نفرض ان المتنبىء الاول استطاع تقديم ثلاثة تنبوءات كانت اقرب للمعلومات الفعلية ، عندها نتبنى هذا المتنبىء الاول ، وإلاّ فنفرض ان الطائرة تناور بطريقة تقلل وفقها من اهمية المعلومات القديمة ، ولا نجد عندها مناصاً من تبني المتنبىء الثاني . إن هذه الطريقة في الوصول الى التنبؤ النهائي هي طريقة غير خطية ، إذ لم تتم صياغة التنبؤ بمجرد ضرب كل معلومة بعدد يتوقف على قدمها ، بل على العكس زدنا أو قللنا من اهتمامنا بالمعلومات القديمة وفق طبيعة المعلومات الجديدة .

وبشكل عام ، هناك عدد لا نهاية له من طرق التنبؤ غير الخطي وفي الواقع ، فالتنبؤ غير الخطي ومعه كل العمليات الاخرى الغير خطية ، هي المجموعة الشاملة لكل الطرق لمتباعدة ، بعد استثناء ابسط الاساليب

اي التنبؤ الخطي والعمليات الخطية الاخرى . نعرف اليوم الكثير عن التنبؤ الخطي ، ولا نعلم بالمقابل إلاّ القليل عن التنبؤ غير الخطي .

اوردنا مثال التنبوء بمواقع الطائرة لكي نمكن القارىء من تحسس الفكرة التي كانت ستبدو لا معنى لها لو عرضناها بشكلها المجرد . الاّ اننا مع ذلك نستطيع طرح المسألة الاعم .

لنتخيل عدداً من الاشارات الممكنة . يمكن أن تتكون هذه الاشارات من أشياء متباعدة كمسارات محتملة للطائرات او كلمات مختلفة قد ينطق بها انسان ما ، ولنتخيل ايضاً بعض الضجيج أو التشويه ، فلربما أن المعلومات الرادارية غير دقيقة بما فيه الكفاية ، أو أن الرجل يتحدث في غرفة ملأى بالضجيج . يتطلب منا في هذا الوضع حساب بعض أوجه الاشارة الصحيحة : مثلاً : الموقع الحالي او المستقبلي للطائرة ، الكلمة التي تفوه بها الانسان للتو او التي سيتفوه بها بعد قليل . نستخدم معلوماتنا الاحصائية عن الاشارة لاتخاذ قراراتنا المناسبة ، ويمكن أن يكون من بين هذه المعلومات : المسارات الاكثر احتمالاً للطائرات ، أو عدد مرات الانعطاف وحدة كل انعطاف ، كما يمكن لهذه المعلومات الاحصائية أن تضم اصناف الكلمات الاكثر شيوعاً واحتمال ورودها بالنسبة لما يسبقها . نفرض اخيراً أن لدينا معلومات احصائية مشابهة عن الضجيج والتشوه .

يتضح اننا نستخدم هنا نفس نوعية المعلومات التي توظفها نظرية الاتصالات . الاّ إننا في نظرية الاتصالات نعتبر مصدراً للمعلومات وقناة ذات ضجيج ، ثم نبحث عن أميز طريقة لترميز الرسائل التي يولدها المصدر بغية بثها بأجود الشروط عبر القناة المفروضة ، اما في التنبؤ فننطلق من مجموعة من الاشارات شوهها الضجيج ثم نتسائل عن كيفية كشف الاشارة الفعلية ، أو حساب جانب منها او التنبؤ به ، مثلاً كقيمة الاشارة عند لحظة مستقبلية .

يتألف الجهاز الرياضي للتنبؤ من النظرية العامة للتنبؤ الخطي التي ابدعها كولوموغروف ووينر ، الى جانب التحليل الرياضي لعدد من نوع خاص من المتنبئين اللاخطيين . اشعر انني لا استطيع المضي ابعد من هذه العبارة ، الا انا لا استطيع أن اقاوم اندفاعي لاعطاء مثال عن نتيجة نظرية اعتبرها مدهشة ، وقد صاغها سليبيان ، وهو رياضي طبعاً .

لنتخيل حالة اشارة خافتة قد تكون أو لا تكون محاطة بضجيج قوي. ومهمتنا أن نقرر فيما اذا كانت الاشارة موجودة فعلاً أم لا . يمكن أن يكون الضجيج والاشارة كمونات كهربائية او انضغاطات صوتية . نفرض أن الضجيج والاشارة قد اتحدا باضافة احدهما للاخر بكل بساطة ، وأن كلاً منهما عبارة عن مصدر مستقر ولكل منهما حزمة تواتر محددة. نضيف اننا نعلم وبدقة طيف تواتر الضجيج ، اي بشكل أوضح ماهي نسبة طاقة الضجيج الواقعة في كل حيز صغير من مجال التواترات ، بينما طيف تواترات الاشارة مختلف عن ذلك . اثبت سليبيان اننا اذا استطعنا قياس الكمون الكلي أو ضغط الصوت للاشارة مع الضجيج وبشكل دقيق عند كل لحظة من اي فترة زمنية مهما كانت قصيرة ، نستطيع تحديد فيما اذا كانت الاشارة موجودة مع الضجيج أم لا وبدون خطأ يذكر ومهما كانت الاشارة خافتة . نشير الى أن هذه النتيجة هي نتيجة نظرية وليست مجرد تطبيق عملي مفيد . لقد كانت نظرية سليبيان هذه بمثابة الصدمة للكثيرين سيما أولئك الذين أكدوا أنه اذا كانت الاشارة ضعيفة بحد معين ، بل وحسبوا ذلك الحد ، فانه لا يمكن كشفها بتفحص مجموع الاشارة والضجيج خلال اي فترة زمنية .

ساوضح ، قبل اغلاق هذا الموضوع العام ، لماذا ربطت به صفتي التنبؤ والكشف ، اضافة لصفتين آخريين هما الترشيح والتنعيم . اذا كان طيف التواتر للضجيج المختلط مع الاشارة مختلفاً عن طيف تواترات الاشارة ، امكننا فصل الاشارة عن الضجيج باستخدام مرشح كهربائي يقطع التواترات السائدة في الضجيج بالمقارنة مع التواترات السائدة في الاشارة . اذا استخدمنا مرشحاً يقتلع كل او معظم مركبات لتواتر

العالية التي تتغير بسرعة مع الوقت ، فاننا نحصل على خرج أبطأ في تغيره بالمقارنة مع الدخل ، نقول عندها أننا قمنا بتنعيم مزيج الاشارة والضجيج .

تحدثنا حتى الآن عن جملة من العمليات نجريها على مجموعة من المعلومات بهدف حساب الاشارة الحاضرة أو المستقبلة وكذلك كشفها . ويترتب على هذا الحساب و الكشف فعل ما ننوي القيام به .

من الممكن مثلاً ان ندفع طائرة صديقة لمطاردة طائرة عدوة أونستخدم الرادار لمراقبة الطائرة العدوة . يزودنا كل رصد جديد بمعلومات قد تجعلنا نغير خطتنا ازاء العدو .

تعرف الآلية المؤازرة على انها جهاز يعمل بشكل مستمر استناداً لقاعدة معلوماتية بهدف تحقيق غاية ما وضمن معطيات متغيرة . لدينا الآن عنصر هام جديد ، فالرادار يقيس موقع الطائرة المعادية بالنسبة لطائرتنا وهكذا تستخدم معلومات الرادار لتقرير التغييرات الضرورية في موقع طائرتنا . تغذى معلومات الرادار بشكل راجع يؤدي لتغيير معلومات الرادار التي سترد في وقت لاحق ، ذلك لان هذه المعلومات ستستخدم في تغيير موقع الطائرة الذي سيتم عنده استقصاء المعلومات الرادارية الجديدة . توصف التغذية الراجعة بكونها سلبية لانها تُستخدم لانقاص الابتعاد المحتمل عن سلوك معين بدلاً من زيادته .

يمكننا ببساطة تصور امثلة اخرى عن التغذية الراجعة السلبية . يقيس منظم السرعة في الآلة البخارية سرعة تلك الآلة ، تستخدم القيمة المقاسه لفتح أو اغلاق الصمام بحيث تتم المحافظة على السرعة عند حد معين . وهكذا تغذى نتيجة قياس السرعة بشكل راجع لتغيير تلك السرعة . يقيس الترموستات حرارة الغرفة ويطفىء تبعاً لذلك او يشعل اجهزة التدفئة بحيث يحافظ على درجة حرارة ثابتة للغرفة ـ عندما يمشي أحدنا وفي يديه صينية فيها ماء ، فانه يجنح الى مراقبة الماء

وموازنة الصينية بحيث لا ينسكب الماء ، الا ان لهذا نتائج سيئة ، فكلما امال صديقنا الصينية بهدف منع انسكاب الماء تحرك الماء بشكل اعنف في الصينية . عندما نطبق التغذية الراجعة لتغيير عملية بالاستناد الى حالتها اللاحظة يصبح وضعها برمته غير مستقر ، بكلمة مختصرة بدلاً من انقاص الانحرافات الصغيرة بالنسبة للهدف المرسوم ، يمكن أن تؤدي التغذية الراجعة لزيادة تلك الانحرافات .

ان هذا مشوش للغاية في حالة دارات التغذية الراجعة . اذا أردنا جعل التصحيحات أكثر كمالاً علينا تقوية التغذية الراجعة . الا ان هذا يفضي بدوره لعدم استقرار الجملة ، والجملة غير المستقرة ليست مرغوبة كما هو معلوم ، اذ أن مثل هذه الجملة قد تفضي الى سلوك مشابه لابتعاد الصاروخ عن الطائرة المعادية بدلاً من ملاحقتها ، ولانخفاض درجة حرارة الغرفة وارتفاعها على شكل قفزات ، أو لاسراع آلة معينة وتوقفها واخيراً لبث أغنية ما من مضخم دون تغذية ذلك المضخم بأي دخل .

لقد درس استقرار انظمة التغذية الراجعة السلبية بعناية فائقة ؛ وقد تم تحصيل كم معلوماتي كبير من هذه الانظمة ، حيث تساوي السمة الحالية مجموع السمات السابقة مضروبة باعداد تتناسب مع البعد الزمني لتلك السمات عن اللحظة الراهنة .

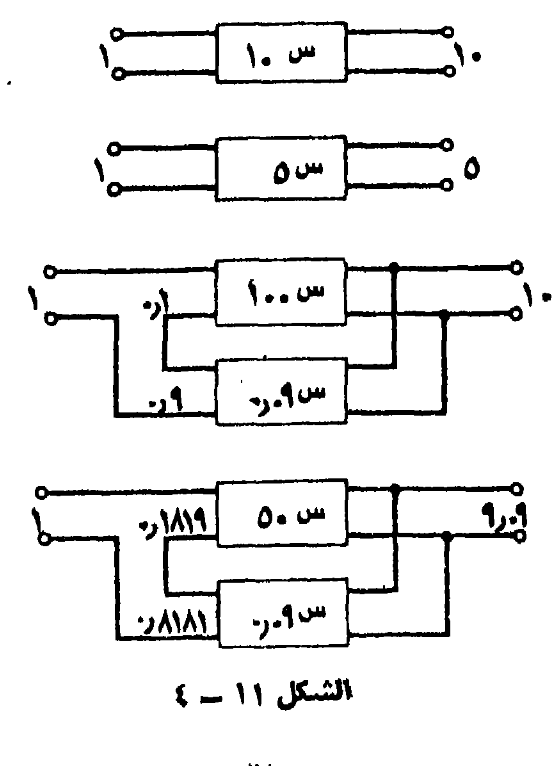
تتسم انظمة التغذية الراجعة السلبية بكونها اما مستقرة او غير مستقرة وذلك بصرف النظر عن الاشارات المغذاة اليها . أما انظمة التغذية الراجعة غير الخطية فيمكن أن تكون مستقرة لبعض انواع الدخل وغير مستقرة لانواع اخرى . تمثل السيارة القديمة غير المتماسكة والمرتجفة نظاماً لا خطياً ، اذ يمكن ان تكون حركتها مستقرة على طريق سوي ناعم ، الا ان نتوءاً صغيراً قد يصادفها سيجعلها ترتجف وسيستمر ذلك الارتجاف حتى بعد تجاوزها للنتوء بمسافة طويلة .

لقد غطى معظم الجهد النظري المبذول في مجال انظمة التغذية الراجعة السلبية ، قطاعاً آخر من الموضوع لم نتطرق اليه بعد ويتعلق بجهاز

اخترعه هارولد بلاك عام ١٩٢٧ يعرف باسم المضخم ذي التغذية الراجعة السلبيــة .

يعرف مردود المضخم على انه نسبة كمون الخرج الى كمون الدخل. تبرز اهمية خاصــة لاستخدام مضخمات ذات مردود ثابت في الهاتف وفنون الالكترونيات الاخرى ، الا" ان الانابيب المفرغة والترانزستورات هي اجهزة غير كاملة اذ يتغير مردودها مع الوقت كما يتوقف ذلك المردود على قوة الاشارة . تلعب المضخمات ذوات التغذية الراجعة السلبية دوراً اساسياً في التقليل مــن اثر هذه التغــيرات في مردود الترانزستورات والانابيب المفرغة .

يتضح لنا سبب ذلك من خلال تفحص الشكل ١١ ــ ٤



الشكل ١١ ــ ٤

لدينا في الاعلى مضخم عادي مردوده عشرة ، اي اذا طبقنا كمون دخل مقداره ١ فولط على اليسار ، نحصل على كمون خرج مقداره ١٠ فولط على اليمين . نفرض أن المردود انخفض الى النصف ، نحصل بذلك على كمون خرج مقداره ٥ فولط كما هو مبين في القسم التالي من نفس الشكل .

يوضح القسم الثالث من الشكل مضخماً ذا تغذية راجعة سلبية صمم لتحقيق مردود قدره عشرة . وهو يتالف من علبتين ، العليا هي مضخم مردوده مئة يربط خرجه الى علبة تقسيم كمون دقيقة للغاية لا تحتوي على ترانزستورات او انابيب ولا تتغير بتغير الوقت او تغير مستوي الاشارة . يتالف دخل العلبة العليا من كمون الدخل ١ فولط مطروحاً منه خرج العلبة السفلى وهو يساوي جداء ٠٩ر٠ في كمون الخرج ١٠ فولط اي ٩ر٠ فولط .

نفرض الآن ان الانابيب او الترانزستورات في العلبة العليا تتعرض للتغيير ، بحيث تعطي العلبة مردود خمسين بدل المردود السابق المساوي لمئة ؛ يوضح القسم الاخير من الشكل هذه الحالة . نشير الى أن الارقام المعطاة فيه هي مجرد ارقام تقريبية ، الا أن الملاحظة المطلوبة هي ان انخفاض المردود الى النصف لم يؤثر على الخرج بأكثر من ١٠ ٪ ، ولو كان هذا المردود اعلى لكان الاثر على الخرج أقل .

لا يمكننا التقليل من اهمية التغذية الراجعة السلبية اطلاقاً ، فالمضخمات من هذا الطراز هامة في الاتصالات الهاتفية ، كما أن الترموستات مثال حي على نجاعة استخدام هذه التغذية . تستخدم التغذية الراجعة السلبية للتحكم في العمليات الكيميائية في المصانع و في متابعة الصواريخ للطائرات المعادية . كما أن الطيارين الآليين على متن مختلف انواع الطائرات يستفيدون من التغذية الراجعة السلبية في الحفاظ على الطائرة ضمن مسار معين .

وبشكل أكثر عمومية ، استخدم التغذية الراجعة السلبية من عيني الى يدي لتوجيه القلم اثناء الكتابة ، وكذلك من اذني الى لساني وشفتي لتعلم الكلام أو تقليد صوت آخر . تستخدم عضوية الحيوانات التغذية الراجعة السلبية بأشكال مختلفة ، وهذا مثلاً ما يجعلها تحافظ على درجة حرارة ثابتة في داخلها رغم تقلبات الطقس حولها ، وكذلك يمكنها من تثبيت الخصائص الكيميائية للدم والنسج . يطلق على قابلية الجسم للاحتفاظ بقطاع محدد من الخصائص رغم تغير المحيط اسم التوازن البدني .

يعد ج. روس . آشبي واحداً من كبار علماء السيبرنيتيك ، وقد كان معلم نفسه . بنى آشبي آلة دعاها موازن البدن لعرض تظاهرات الموازنة مع البيئة التي يعتقد انها تشكل الميزة الاولى للحياة . وقد زودها بعدد من دارات التغذية الراجعة وواسطتين لتغييرها ، يتحكم في واحدة منها الموازن البدني ، بينما يتحكم في الاخرى الشخص المشرف على تشغيل الآلة والذي يلعب دور البيئة . اذا تغيرت دارات الآلة استجابة للبيئة بحيث تصبح في حالة عدم استقرار ، فان الآلة لا تلبث ان تعيد ضبط الدارات بالمحاولة والخطأ بهدف العودة الى الاستقرار مرة ثانية .

يمكننا اذا شئنا تشبيه سلوك الموازن البدني هذا بحالة طفل يحاول تعلم المشي دون أن يقع ثم تعلم قيادة الدراجة دون أن ينقلب وكذلك بحالات أخرى كثيرة نتعرض لها في حياتنا . يؤكد وينر في كتابه « السيبرنيتيك » على دور التغذية الراجعة السلبية كعامل هام للتحكم العصبي ، كما يؤكد ان بعض الاعاقات كارتجاف الايدي تتسبب مباشرة عن اضطراب نظام التغذية الراجعة السلبية في الجسم .

عرضنا حتى الآن لثلاثة مكونات للسيبرنيتيك : نظرية المعلومات ، الكشف والتنبؤ بما في ذلك التنعيم والترشيح ، واخيراً التغذية الراجعة السلبية متضمنة الآليات المؤازرة والمضخمات ذوات التغذية الراجعة السلبية . نقرن عادة اجهزة الكومبيوتر والادوات المعقدة الاخرى المشابهة

مع السيبرنيتيك . تستخدم كلمة الاتمتة احياناً للاشارة الى هذه الآلات المتقدمـــة .

يمكن للباحث أن يجد للتكنولوجيا المعاصرة جذوراً في انجازات القرون الغابرة ، الا أن دراسة تلك الاصول لن تقدم الكثير على صعيد فهم هذه التكنولوجيا . يتعلم الانسـان بالعمل ومن خلال التأمل بما عمله . لقد زادت امكانات العمل في حقل الآلات المعقدة بشكل لم يسبق له مثيـل بالمقارنة مع الازمان السـالفة كما ان محرضـات التفكير قد تنامت الـى حدود لا يمكن الاحاطة بها .

ان تقفي الآثار التاريخية للآلات المعقدة يصل بنا الى المقاسم الهاتفية الآلية التي شاهدت النور لاول مرة في النصف الثاني من القرن الماضي ، وكانت تلك المقاسم بدائية تعمل باسلوب الخطوة ـ خطوة حيث تعمـد آلية محددة لتوضيع قطاع معين من حلقة الاتصال الهاتفية كلما تم تسجيل احد مكونات الرقم الهاتفي الذي ننوي مخاطبة صاحبه . تطورت هذه المقاسم الى انظمة التحكم الشاملة ، حيث لا تشغل الارقام قواطع المقسم بشكل مباشر ، اذ يخزن الرقم اولاً او يمثل كهربائياً او ميكانيكياً في احد اجزاء المقسـم . تختبر بعد ذلك آلية كهربائية في جزء آخر مـــن المقسم الدارات الكهربائية التي يمكن استخدامها لوصل طالب المخابرة بالرقم المطلوب حتى يجد واحدة غير مشغولة يستخدمها لتحقيق الاتصال المنشـــود .

تتسم المقاسم الحديثة بتعقيد بالغ وحجوم كبيرة ، اذ تصمم اصلاً لوصل كل مدن وقرى قطر معين ببعضها في شبكة اتصال مباشر ، لذا تعد هذه المقاسم قمة التكنولوجيا التي ابدعها الانسـان ويستدعي وصف جزء من عملها عدداً كبيراً مـــن الكلمات . ان ادارة قرص التلفون تعني اليوم البحث عن اكثر الخطوط اقتصادية لاستخدامه في وصل الطالب بالرقم المنشود ، وربما في عملية التفاف حول العديد من المدن اذا كان معظم الخطوط مشغولاً . وما يفعله المقسم بعد تحقيق الاتصال هـــو

توقيت المخابرة وقياس مدتهـا وتحديد أجرتها تبعاً لذلـك ، كما انه سيفصل كل الدارات المرتبطة اذا قطع احد الفريقين المخابرة ، وما هو أهم من ذلك ان المقسم يبلغ كومبيوتراً مركزياً عن الاعطال التي قد تحدث فيه ، ويستمر بالعمل رغم حدوث تلك الاعطال .

لعل من اهم مكونات المقاسم الهاتفية العناصر المعروفة باسم الحاكمات الكهربائية . تتالف الحاكمة الكهربائية من مغناطيس كهربائي ذي نـواة مغناطيسية تقف قبالتها رقاقة معدنية صغيرة متحركة تغلق في أحـد اتجاهي حركتها دارة كهربائيـة عندما تمس قطعاً أخرى ثابتـة (على غرار آلية عمل الجرس الكهربائي) . عندما يمر التيار الكهربائي في وشيعة المغناطيس الكهربائي ، تنجذب الرقاقة المغناطيسية وتتحرك ، وتكـون النتيجة أن بعض الرقاقات المتحركة تبتعد عما يقابلها من القطع الثابتـة فتفتح قسماً من الدارات ، بينما تقترب رقاقات متحركة اخرى من قطع ثابتة مقابلة وتغلق قسماً آخر من الدارات .

طبق ج. ر. ستيبتيز من شركة بيل في الثلاثينات من هذا القـرن تكنولوجيا الحاكمات والمركبات الاخرى للمقاسم الهاتفية في بناء آلـة حاسبة كبيرة كان بامكانها تنفيذ العمليات الحسـابية الاربعة مهما بلغت من التعقيد . تابعت شركة بيل انتاج أجهزة الكومبيوتر وفق نفس الاسس اثناء الحرب العالمية الثانية لاغراض عسكرية . اما هوارد ايكن وزملاؤه فقد بنوا اول كومبيوتر يعتمد الحاكمات الكهربائية في جامعة هارفارد عام ١٩٤١ .

اتت الخطوة الاساسية في زيادة السرعة لاجهزة الكومبيوتر بعد فترة قصيرة من الحرب على يد ج. ب. ايكرت و ج. و. موشلي اللذان بنيـا جهاز الايناك وهو كومبيوتر يعتمد الانابيب المفرغة ، وقد حلت مؤخـراً الترانزستورات والدارات المتكاملة محل الانابيب المفرغة في بناء اجهزة الكومبيوتر .

وهكذا فقد كانت الفترة الحاسمة من تاريخ الآلات المعقدة هي فترة تحققها وتصنيعها ، أولاً باستخدام الحاكمات ومن ثم باستخدام الانابيب المفرغة والترانزستورات .

لم يتحقق بناء الاجهزة المعقدة عند توفر العناصر المطلوبة وحسب ، بل كان من الواجب رسم المخططات السليمة لربطها ببعضها بغية تنفيذ مهمات معينة كالتقسيم والضرب . كان من أهم اعمال ستيبيتز وشانون تطبيق جبر بول ، وهو فرع من المنطق الرياضي ، على توصيف وتصميم الدارات المنطقية .

وهكذا فقد تكامل بناء الآلات المعقدة الهادفة لحل مشاكل معينة بتوفير المركبات المناسبة وابداع التصاميم المبتكرة لربطها ببعضها . ان التنظيم ، وهو جوهر الآلة ، أساسي وحاسم ، الا أن الآلة لم تكن لتوجد لولا تصنيع مكوناتها .

كانت الآلة الحاسبة التي بناها ستيبيتز بلا روح ، اذ كان المشغل يغذيها بزوج من الاعداد العقدية فتهتز وترتجف ، ثم تستجيب باعطائه المجموع ، الفرق ، الجداء ، أو حاصل القسمة . الا أنه استطاع عام ١٩٤٣ تصنيع كومبيوتر باستخدام الحاكمات ، كان يتلقى التعليمات (أي البرنامج) بواسطة شريط ورقي طويل ، وكان هذا البرنامج يتضمن العمليات المطلوب اجرائها والاعداد التي ستجري عليها هذه العمليات .

تحققت خطوة متقدمة في الكومبيوتر عندما أصبح بالامكان الاستعانة بقسم سابق من شريط البرنامج لاكمال مهامه ، أو استخدام شريط برنامج جانبي للمساعدة في حساباته . لقد أصبح بامكان الكومبيوتر في هذه الحالة اتخاذ قرار ما عند بلوغه نقطة معينة ، ومن ثم متابعة العمل استناداً لهذا القرار . نفرض أن الكومبيوتر كان بصدد حساب المتسلسلة التالية : وذلك باضافة حدودها حداً اثر حد :

$$1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \frac{1}{9} - \frac{1}{11} + \cdots\cdots\cdots$$

يمكن أن نبرمج الكومبيوتر بحيث يتابع اضافة الحدود حتى يقابل حداً أقل من $\frac{1}{1000000}$ ويطبع المجموع عند ذلك ثم ينصرف الى حسابات اخرى . يتخذ الكومبيوتر قراراً بطرح آخر حد قام بحسابه من $\frac{1}{1000000}$ ، فاذا كانت النتيجة سالبة قام بحساب حد جديد واضافه الى المجموع السابق ، اما اذا كانت النتيجة موجبة طبع المجموع اذ ذاك على الطابعة وانتقل الى الجزء التالي من البرنامج لمتابعة بقية التعليمات.

اقترنت القفزة الكيفية الكبيرة التالية في تطوير اجهزة الكومبيوتر باسم جون فون نويمان الذي وسع استخدام اجهزة الكومبيوتر الأولى في حسابات تتعلق بالقنابل الذرية . لقد امتلكت ، حتى أجهزة الكومبيوتر الأولى ، مخازن أو ذاكرات ، تحفظ فيها وبشكل مؤقت النتائج المتوسطة للحسابات التي لا تلبث أن تستخدم في إكمال هذه الحسابات ، كما تحتفظ تلك الذاكرات بالنتائج النهائية تمهيداً لطبعها . طرح فون نويمان فكرة خزن البرنامج في ذاكرة الكومبيوتر بدلاً من تغذيته به على شريط ورقي . لقد جعل ذلك التعليمات في متناول الآلة ، كما مكنها من تغيير بعض هذه التعليمات بناء على نتائج الحسابات المرحلية .

كانت الأرقام العشرية تختزن في الآلات الحاسبة القديمة على دواليب مسننة صمم كل منها ليأخذ عشرة أوضاع مختلفة . اما اليوم فتحتفظ الآلات الحاسبة الحديثة واجهزة الكومبيوتر بالأعداد في صيغتها الثنائية ضمن صفوف عديدة من الدارات المتكاملة . تقتضي المحافظة على المعلومات ضمن هذه الدارات توفير مصادر دائمة للتيار الكهربائي وبكميات قليلة ، يدعى تخزين المعلومات بهذا الأسلوب ، التخزين السريع الزوال ، لأن انقطاع التيار الكهربائي يمحو المعلومات من الذاكرة . يمكننا رفع

الوثوقية من تخزين المعلومات بزيادة الاجراءات الكفيلة بمنع انقطاع او اضطراب التيار الكهربائي .

إن الطراز القديم للذاكرات كان يحافظ على المعلومات رغم انقطاع التيار .. اذ كانت الذاكرة تتالف بشكل رئيسي من مغانط حلقية تخترقها جملة من الاسلاك الكهربائية ، و كانت تلك المغانط توضع في صفوف متوازية ، وتمثل جهة تمغنط الحلقة رقما ثنائيا معينا .. إن انقطاع التيار لا يؤثر على تمغنط الحلقات ، لذا تبقى المعلومات كما هي لدى هذا الانقطاع ، اللهم إلا اذا حدث تشويش معين في التيار أدى الى تغيير بعض اتجاهات التمغنط بشكل خاطىء ، مما يتسبب في الاحتفاظ بمعلومات خاطئة . دعيت هذه الذاكرات لدى اختراعها بالذاكرات المركزية .

توصف الذاكرات المركزية وذاكرات الدارات المتكاملة بانها ذاكرات عشوائية التناول .. إذ يمكن استرجاع اي زمرة من الارقام الثنائية من الذاكرة في جزء من الميكروثانية (الميكروثانية جزء من مليون من الثانية ، بمجرد تغذية الذاكرة بزمرة اخرى من الارقام الثنائية هي العنوان من الذاكرة حيث تقبع الزمرة المنشودة . ترصف الأرقام الثنائية عادة في زمر مكونة من ثمانية أرقام تدعى بايت ، او ستة عشر رقما تدعى كلمة .

كانت الأرقام الثنائية تخزن ، في أيام الكومبيوتر الأولى ، على هيئة ثقوب في شريط ورقي ، اما الآن فتخزن وفق تشكيلات مغناطيسية بالغة الدقة على اشرطة او اقراص مغناطيسية .. وهكذا نشاهد الكاسيتات الشبيهة بكاسيتات آلات التسجيل في اجهزة الكومبيوتر الصغيرة والشخصية ، اذ توفر هذه الكاسيتات بيئة رخيصة لتخزين المعلومات . يوصف تخزين المعلومات على الأشرطة او الاقراص المغناطيسية بكونه تسلسلي ، إذ حتى نصل معلومة معينة نرغب بالتعامل معها ، لا بد أن نتجاوز كل ما سبقها من المعلومات . وهكذا فالتخزين التسلسلي ابطأ بكثير من التخزين العشوائي ، وهو يستخدم لخزن كمية كبيرة من

المعلومات ، او لخزن البرامج والمعلومات التي تنقل وبشكل متكرر الى ذاكرات التناول العشوائي . تستخدم الاشرطة المغناطيسية في حفظ نسخة اضافية عن كل البرامج والمعلومات الهامة كإجراء احتياطي في حال إصابة ذاكرة التناول العشوائي او الاقراص المغناطيسية باعطال قد تؤدي للإساءة الى المعلومات المتوضعة في هذه الاوساط .

تضم اجهزة الكومبيوتر اضافة للذاكرة والتخزين ، وحدات الحساب التي تنفذ كل العمليات الحسابية والمنطقية وتتابع تعدادها . ووحدة التحكم التي تضبط تدفق التعليمات وتنفيذها وكذلك الاتصال باجهزة الإدخال والإخراج ، كما يكمن ان يضاف الى الكومبيوتر وحدات اخرى لتنفيذ مهمات خاصة كتحليل فورييه وقلب المصفوفات وغيرها .

يتوجب على مستخدم الكومبيوتر الذي يرمي لإجراء عمليات محددة ، حتى لو كانت بقصد التسلية ، ان يكتب برنامجاً مفصلاً يطلع من خلاله الكومبيوتر على ادق التفاصيل المتعلقة بتلك العمليات .. كان المبرمجون الأوائل يبذلون جهوداً جبارة لتحقيق ذلك ، إذ كما هو معلوم يتعامل الكومبيوتر داخلياً مع الأرقام الثنائية ، لذا كان على هؤلاء كتابة البرامج بالترميز الثنائي مباشرة .

إلا ان الكومبيوتر يمكن ان يترجم سلاسل الاحرف والأرقام العشرية الى سلاسل مقابلة من الارقام الثنائية وفق قواعد معينة . كما يمكن كتابة برامج جزئية تحفظ لتنفيذ مهام جزئية غير ملحوظة في مبنى الكومبيوتر الرئيسي ، مثلاً حساب مساحات نموذجية مطلوبة على الدوام في الأعمال الطبوغرافية . لذا تم تطوير اللغات التجميعية والتي يطلق عليها ايضاً اسم لغات الآلة ، وهي تقع في مرحلة متوسطة بين النهج الثنائي الذي يتبعه الكومبيوتر في داخله ، وبين لغات البرمجة المتقدمة التي يتعامل مستخدم الكومبيوتر بموجبها مع الكومبيوتر .

عندما يكتب المبرمج برنامجه باللغة التجميعية ، عليه أن يكتبه في خطوات متتالية ، كما انه يستطيع تحديد مجموعات الخطوات الجزئية التي على الكومبيوتر اتباع أي منها في حال تحقق شرط ما أو عدم تحققه، ككون نتيجة ما اكبر او أصغر أو مساوية لقيمة أخرى . إلا أن الأرقام التي يكتبها في مثل هذا البرنامج هي ارقام عشرية ، كما أن التعليمات بسيطة في شكلها مما يسهل عملية استذكارها ، مثلاً كتعليمة CLA وهي اختصار CLEAR ADD ، اي تخلية وجمع ، ويعني ذلك وضع العدد صفر في المراكم ثم اضافة العدد الموجود في عنوان معين من الذاكرة الى هذا المراكم .

لا شك أن كتابة البرنامج بلغة الآلة ، اي باللغة التجميعية هي عملية متعبة للغاية . تتسم أجهزة الكومبيوتر بأنها عملية لأن لها انظمة تشغيل يمكن للكومبيوتر من خلالها وباستخدام عدد بسيط من التعليمات أن يقرأ المعلومات ويطبعها وأن يؤدي وظائف اخرى ، والسبب الرئيسي في ذلك أن برامج الكومبيوتر تكتب عادة بلغات البرمجة المتقدمة ، وحتى أنظمة التشغيل تكتب بهذه اللغات .

يزداد عدد لغات البرمجة المتقدمة في كل يوم ، ومن اهم هذه اللغات هي لغة الفورتران FORTRAN ، وهي منحوتة بالأجنبية من كلمتين : FOR مـن FORMULA اي العلاقة بين بعض المتغيرات ، و TRAN مـن TRANSLATION اي ترجمة ، وهي من أقدم لغات البرمجة وأكثرها دواماً ، وتستخدم بشكل رئيسي في التطبيقات العلمية ، وكمثال على تعليمة وفق هذه اللغة ، نورد التعليمة التالية :

IF Z < 80 GOTO 7

ويعني ذلك انه إذا كانت قيمة المتغير Z اقل مـن 80 فعلـى الكومبيوتر أن يترك التنفيذ المتسلسل لتعليمات البرنامج وأن يقفز الى الموقع من البرنامج المحاذي للرقم 7 . امـا اذا كان Z اكبـر أو يسـاوي الـ 80 فيتابع الكومبيوتر تنفيذ البرنامج وفق التسلسل الطبيعي لتعليماته .

تعتبر لغة الباسيك ابسط من لغة الفورتران ، لذا فهي أوسع انتشاراً . أما لغة البرمجة المسماة بالأجنبية C فتستخدم بشكل رئيسي في كتابة انظمة التشغيل والحسابات العددية . وواقع الأمر ان لغات البرمجة تجنح نحو البساطة عندما تصمم لتحقيق اغراض معينة كالحسابات العددية او معالجة النصوص اللغوية وكذلك تمثيل الجمل الكهربائية او الميكانيكية او الاقتصادية . تقاس البساطة هنا بزمن تشغيل الكومبيوتر اللازم لاداء إحدى هذه المهمات .

يحوّل البرنامج من صيغته المكتوبة بإحدى لغات البرمجة المتقدمة الى لغة الآلة باستخدام نظام اضافي يسمى المترجم وهو ينفذ هذا التحويل على مجمل البرنامج دفعة واحدة ، وهناك نظام من نوع آخر يحول البرنامج سطراً بعد سطر ، يطلق على هذا النظام اسم المفسر والمترجمات اكثر فعالية وشيوعاً . يصاحب إدخال البرنامج الى الكومبيوتر تشغيل برامج اخرى تجهز بها أجهزة الكومبيوتر بشكل مسبق ومهمتها تصحيح اخطاء الادخال دون الحاجة لاعادة ادخال كامل التعليمة التي حصل فيها الخطأ .

ينتشر تعلم البرمجة اليوم في كل الأوساط بدءاً من اطفال المدارس الابتدائية حتى طلاب الجامعات مروراً بالمراحل الثانوية ، كما تشترط كل الجامعات على المتقدمين للحصول على شهادة الدكتوراه بمختلف الفروع ، أن يلموا إلماماً جيداً بالكومبيوتر والبرمجة .

يدخل استخدام الكومبيوتر قطاعات جديدة من الحياة في كل يوم ، كما اصبح جزءاً لا يتجزأ من قطاعات اخرى كغزو الفضاء وصنع السيارات ومتابعة عمل المصانع الكيميائية وجرد المستودعات وحجز الأماكن في الفنادق ومكاتب السفريات وتشكيل الطيوف الثلاثية الأبعاد وإخراج الأفلام السينمائية ولعب المباريات وقراءة النصوص وتاليف الأعمال الموسيقية السيئة بالطبع والخالية من اي مضمون انساني . وأعداد اخرى من التطبيقات يضيق المجال عن ذكرها هنا . استطاعت تكنولوجيا الدارات المتكاملة توسيع قاعدة الانتاج لاجهزة الكومبيوتر لدرجة دخل معها الكومبيوتر كل بيت واصبح وسيلة ناجحة للتسلية .

تتسم علوم البرمجة بسهولة تعلمها حتى من قبل الاطفال ، إلا أن اعداد البرامج الهادفة لحل مشــاكل معينة هي مهمة صعبة للغاية ، وتزداد صعوبة هذه المهمة كلما كان الكومبيوتر اصغر حجماً .

تنفق اليوم أموال طائلة لاعداد البرامج الطويلة والمعقدة ، ربما اكثر مما ينفق على تحسين الأجهزة ذاتها . يستطيع مبرمج حاذق إعداد برنامج قصير ينفذ وظائف معينة بينما قد يتعثر آخرون في اعداد برنامج مماثل . ويكاد يكون معيار استخدام الكومبيوتر وجود المبرمج الجيد قبل وجود الكومبيوتر الجيد ، ولاتتو فر اعداد كافية من المبرمجين المهرة لتغطية الاحتياجات الواسعة لاستخدام الكومبيوتر في مختلف المجالات.

ورغم ذلك فقد فشل ابرع المبرمجين في جعل الكومبيوتر ينفذ اعمالاً محددة .. يقوم الكومبيوتر بكل ما يطلب منه ، بشكل ادق لا يستطيع الكومبيوتر القيام بوظائف لا يفهم المبرمج اصلاً فحواها وكل تفاصيلها تستغرق الحسابات الالكترونية في كثير من الأحيان وقتاً طويلاً وتكلف مبالغ كبيرة ، ولكن في كثير من الاحيان نجد انفسنا عاجزين عن استخدام الكومبيوتر لمهمة معينة . اما عن اهم المشاكل التي لم نستطع حلها حتى الآن باستخدام الكومبيوتر فهي في واقع الامر كثيرة ونعد منها : طباعة الكلام المنطوق والترجمة من لغة لأخرى وبرهان نظريات رياضية متقدمة وتاليف موسيقى ممتعة .

سعى الكثيرون لحل بعض او كل المشاكل التي اشرنا اليها ، وقد ادى ذلك الى بروز ابحاث جديدة وهامة تتعلق بتفاصيل هذه المشاكل وما يترتب عليها ، كتمييز الأحرف المكتوبة ، بناء اللغة ، استراتيجيات الألعاب ، اسس التاليف الموسيقي ، ونظريات البرهان الرياضي .

ادى التصدي لحل المشاكل المعقدة وغير العادية على الكومبيوتر الى تعميق فهمنا لعملية الإدراك . وهكذا اذا تحدث أحد العلماء المعاصرين عن احاطته بالسلوك الانساني في ظروف معينة او علمه بطريقة حل مسالة رياضية او منطقية معينة ، فما يحدث في اغلب الاحيان هو ان يحاول

ذلك العالم اثبات ما ذهب اليه بتصميم برنامج للكومبيوتر يمثل السلوك المعني او يغطي تفاصيل البرهان المنشود. اما اذا لم يستطع هذا الدارس توظيف الكومبيوتر في ابحاثه ، فسيبقى فهمه لموضوع بحثه غير كامل . او ربما غير حقيقي ومضللاً .

هل سيتمكن الكومبيوتر من التفكير ؟ لا نستطيع ان نربط معنى محدداً بهذا السؤال إذا لم نفهم اولاً ما نقصده بكلمة تفكير . يعرض مارفن مينسكي ، وهو رياضي متميز له اهتمامات كبيرة في مجال أجهزة الكومبيوتر واستخدامها ، الحوار القصير التالي . يتحدث الناس عن لاعب شطرنج قدير يغلب كل اللاعبين الآخرين بقولهم: « يا له من عبقري فذ ، يا لعظمة المخ الذي يمتلكه ، انه مفكر كبير فعلاً » . يوجه السؤال التالي الى هذا اللاعب : « كيف تستطيع هزم كل خصومه في اللعب » ، فيجيب : « لدي قواعد معينة اطبقها في الانتقال الى اللعبة التالية » . يعلق المستمعون بسخط « إن هذا ليس تفكيراً اطلاقاً ، فنحن ازاء عملية ميكانيكية محضة » .

يرغب مينسكي من ذلك ان يؤكد ان الناس يجنحون الى تعريف التفكير على انه تلك العمليات التي تستعصي على فهمهم . سأذهب ابعد من ذلك واقول إن الكثيرين يعتبرون كعملية تفكير اي خلط للكلمات الهامة في صيغ إعرابية مقبولة . اعمد في بعض الحالات لحل مشاكل فكرية الطابع رغم انها ميكانيكية في فحواها . على كل حال يبدو أن الفلاسفة والمفكرون سيثابرون على تبني تعريف للتفكير يكون التفكير بمقتضاه كل ما تعجز الآلة عن عمله في مرحلة معينة . لن يسبب هذا التعريف لي اي ازعاج سيما اذا كان مبهجاً لاصحابه ، وان كنت اعتقد انه يستحيل من حيث المبدأ التفريق بين ما يمكن للإنسان عمله وما يمكن بالمقابل للآلة ان تعمله ، حتى عند اعتبار ما طرحه العالم الرياضي البريطاني تيورينغ عام ١٩٣٦ م عن لعبة التقليد .

يُسند الدور الرئيسي في هذه اللعبة الى باحث يكون على صلة بإنسان وبكومبيوتر عن طريق لوحتي ازرار، إلا انه لا يدري اي اللوحتين

ترتبط بالانسان او الآلة . يحاول هذا الباحث اكتشاف صلة كل من اللوحتين بطرح الأسئلة ، وقد تمت برمجة الكومبيوتر بهدف خداع الباحث . ان نجاح اللعبة المتجسد بتضليل الباحث تماماً يتجاوز امكانات الكومبيوتر والبرمجة في العصر الحاضر ، ويحتاج ربما لعدة مئات من السنين ، وقد لا يكون من الممكن تحقيقه أبداً .

رأينا ان السيبرنيتيك هو مجال بالغ السعة ، فهو يتضمن نظرية الاتصالات التي افردنا لها كتاباً كاملاً ، كما يتضمن التنبؤ والتنعيم البالغي الأهمية في التطبيقات الرادارية والعسكرية ، فوفق وينر ، عندما نحاول تحديد الموقع الحقيقي لطائرة سواء في اللحظة الراهنة او في المستقبل إنما نتعامل في هذه الحالة مع السيبرنيتيك . وكذلك نكون على احتكاك مع السيبرنيتيك عندما نستخدم مرشحاً كهربائياً لفصل الضجيج من تواتر معين عن الإشارة من تواتر مختلف .

تركز انجاز وينر في هذا المجال الواسع ، وكان عمله الكبير النظرية العامة للتنبؤ الخطي حيث يتم التنبؤ بضرب كل معلومة برقم يتناسب عكساً مع قِدَمها ثم جمع النتائج .

اما المكونة الاخرى للسيبرنيتيك فهي التغذية الراجعة السلبية . يعمل الترموستات وفق هذه التغذية عندما يتابع درجة الحرارة في غرفة ويطفىء أو يشعل تبعاً لذلك جهاز تدفئة للحفاظ على درجة حرارة ثابتة في الغرفة ، كذلك شأن الطيارين الآليين عندما يديرون اجهزة الطائرة لتثبيت ارتفاع الطائرة وجهة طيرانها . واخيراً يستخدم بنو البشر التغذية الراجعة السلبية للتحكم بحركة أيديهم اثناء قيامهم بالأعمال المختلفة .

قد تكون اجهزة التغذية الراجعة السلبية غير مستقرة ، اذ يمكن ان يؤدي الخرج احياناً لإبعاد السلوك وبشكل كبير عن الهدف المنشود. يعزو وينر الارتجاف لدى الانسان وبعض امراضه الأخرى الى خلل في آلية التغذية الراجعة السلبية لديه .

تستخدم التغذية الراجعة السلبية ايضاً في توفيق شكل إشارة الخرج الكبيرة من مضخم مع إشارة الدخل الصغيرة . لقد كان لهذه التغذية اهميتها القصوى في نظرية الاتصالات قبل ظهور السيبرنيتيك .

ابرز السيبرنيتيك اهمية الأتمتة المتمثلة بالآلات المعقدة كمقاسم الهاتف التي انقضى على ظهورها فترة طويلة ، واجهزة الكومبيوتر التي وضعت في الاستخدام بعد الحرب العالمية الثانية .

اذا كان الأمر كذلك ، فيضم السيبرنيتيك بين جناحيه كل محصلة التكنولوجيا المعاصرة باستثناء انتاج الآليات الضخمة . نجد في السيبرنيتيك المعارف المتعلقة بتنظيم وعمل البيولوجيا الانسانية . وتنصهر في بوتقته كل الأبحاث الحديثة في العالم ، ففي هذه البوتقة تتوضع المشاكل الاجتماعية ، الفلسفية ، وكذلك الاخلاقية .

وهكذا اذا وصفنا انساناً ما بكونه عالم سيبرنيتيك ، فإن ذلك لن يعطينا فكرة محددة عن مجال تخصصه ، إلاّ اذا كان هذا الانسان عبقرياً شمولياً بشكل استثنائي إذ ليس بالضرورة أن يحيط عالم السيبرنيتيك بكل تفاصيل نظرية المعلومات .

ولحسن الحظ ، فالقليل من العلماء يعتبرون أنفسهم اخصائيي سيبرنيتيك ، إلاّ اذا استثنينا احاديث بعضهم لن يعتبرونهم في حالة فقر بالنسبة لقواعدهم المعلوماتية . وهكذا اذا كان السيبرنيتيك غامضاً وممتداً ، فان ذلك لن يضر كثيراً . ويبقى مصطلح السيبرنيتيك مفيداً جداً ، وهو يضيف بهجة كبيرة للإنسان ، أو لموضوع البحث ، وحتى لكتاب . وهذا ما هدفت اليه هنا ، أن أضيف قليلاً أو ربما كثيراً من البهجة في هذا الكتاب .



الفصل الثاني عشر

نظرية المعلومات وعلم النفس

قرأت حول موضوع نظرية المعلومات وعلم النفس اكثر مما اتذكره أو احتاجه لاهتماماتي . وكان معظمه منصباً على ربط مصطلحات جديدة بأفكار قديمة غامضة ، اذ أن الآمال كانت متمحورة حول امكانية توضيح تلك الافكار بفعل سحري بمجرد طرح كلمات جديدة .

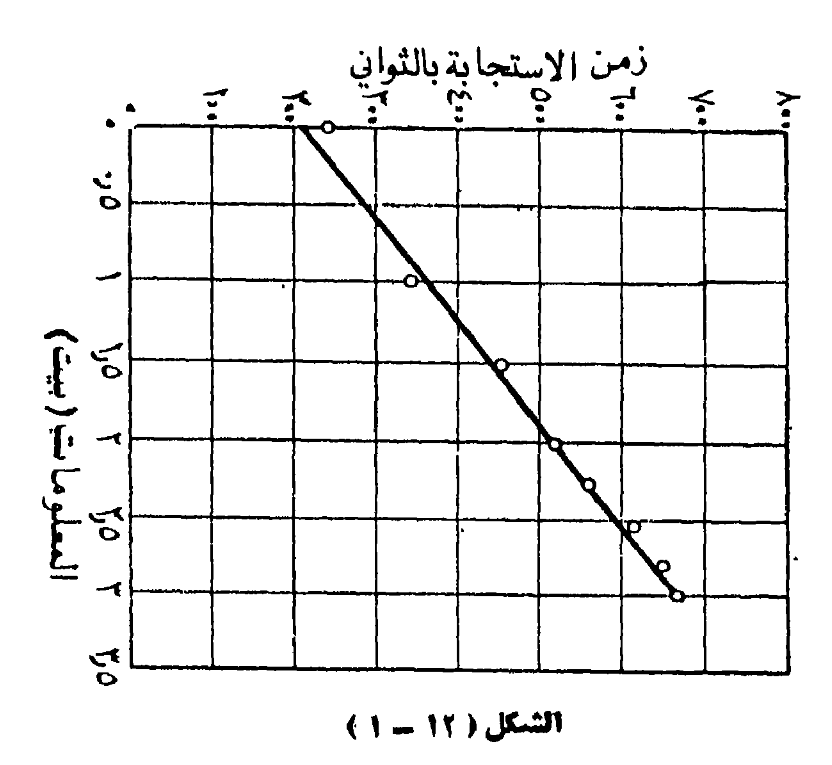
الا أن بعض تطبيقات نظرية المعلومات في حقل علم النفس التجريبي قيمة . يصعب ان نستنتج من هذه المعلومات أحكاماً نهائية ومؤكدة ، الا أنها تشكل قاعدة ، او ربما سبباً ، لتخمينات مثيرة ساحاول في هذا الفصل عرض بعض التجارب البسيطة والمفهومة المرتبطة بنظرية المعلومات وعلم النفس . وقد قمت بانتقائها من خلال خبرتي الشخصية واهتماماتي اشير هنا الى ضرورة فرض بعض التحفظات لدى تناول أي موضوع واسع وغير واضح المعالم بشكل كامل .

يبدو لي ان رد الفعل الاولي لعلماء النفس تجاه نظرية المعلومات انبثقت عن كون الانتروبي معياراً شاملا ومتميزاً لكمية المعلومات ، وعن حقيقة استخدام الكائن الانساني للمعلومات . يعني ذلك بشكل ما أن صعوبة مهمة معينة ، متمثلة في الزمن اللازم لانجازها ، انما تتناسب مع كمية المعلومات المتوفرة .

تتوضح هذه الفكرة في تجارب اجراها راي هايمان وهو عالم نفس تجريبي ونشرها في مجلة علم النفس التجريبي عام ١٩٥٣ ساقتصر هنا على عرض تجربة واحدة من عدة تجارب أجراها هايمان .

توضع عدة اضواء امام الشخص المختبر . وقد ربط كل ضوء بكلمة وحيدة المقطع تم ابلاغ الشخص المعني عنها تبدا التجربة باشارة تنبيه يعقبها وميض احد الاضواء ثم يطلب من الشخص المختبر ذكر اسم الضوء بالسرعة الممكنة . تقاس الفترة الزمنية الفاصلة بين الوميض ونطق الشخص المختبر باسم الضوء الذي انار .

كانت التجربة تجري في بعض الاحيان على ثمانية اضواء يومض احدها بشكل عشوائي على اساس احتمالات متساوية تكافىء هذه الحالة المعلومات المنقولة للشخص المختبر ، والتي تمكنه من تمييز الضوء بشكل كامل ، لع ٨ أو ٣ بيت . كان عدد الاضواء في بعض الحالات ٧ (٨١ر٢ بيت) أو ٦ (٥٨ر٢ بيت) أو ٥ (٣٢ر٢ بيت) أو ٤ (٢ بيت) أو ٣ (٥٨ر١ بيت) او ٢ (٠ بيت) رسم بعد ذلك الخط البياني الممثل للزمن الفاصل بين الوميض وذكر اسم الضوء ، اي زمن الاستجابة بدلالة كمية المعلومات مقدرة بالبيت كما في الشكل ١٢ — ١ .



الشكل (١٢ — ١)

يتضح أن هناك وقت استجابة معيناً حتى في حالة استخدام ضوء وحيد ، فالاختيار بين الاضواء أكيد وكمية المعلومات المنقولة في هذه الحالة تساوي الصفر . عندما يزداد عدد الاضواء ، يزداد زمن الاستجابة بشكل مطرد مع كمية المعلومات المنقولة . ان هذا الازدياد المتناسب مع لوغاريتم عدد البدائل كان قد لوحظ من قبل عالم نفس الماني هو ج. ميركيل عام ١٨٨٥ . تبدو هذه النتيجة الحقيقية مؤكدة قابلة للتكرار عن السلوك الانساني .

نلاحظ من الشكل ١٫٢ ـ ١ ان ازدياد زمن الاستجابة هو حوالي ١٥ر. ثانية لكل بيت . يذهب بعض علماء النفس غير المتحفظين الى التاكيد بأنه يلزم الانسان حوالي ١٥ر. ثانية للاستجابة لكمية من المعلومات تساوي ١ بيت . وهكذا فالسعة المعلوماتية للانسان هي $\frac{١}{١٥ر.}$ = ٧ بيت في الثانية . هل يعني ذلك اننا قد وضعنا اليد على ثابت عام للادراك أو التفكير الانساني ؟

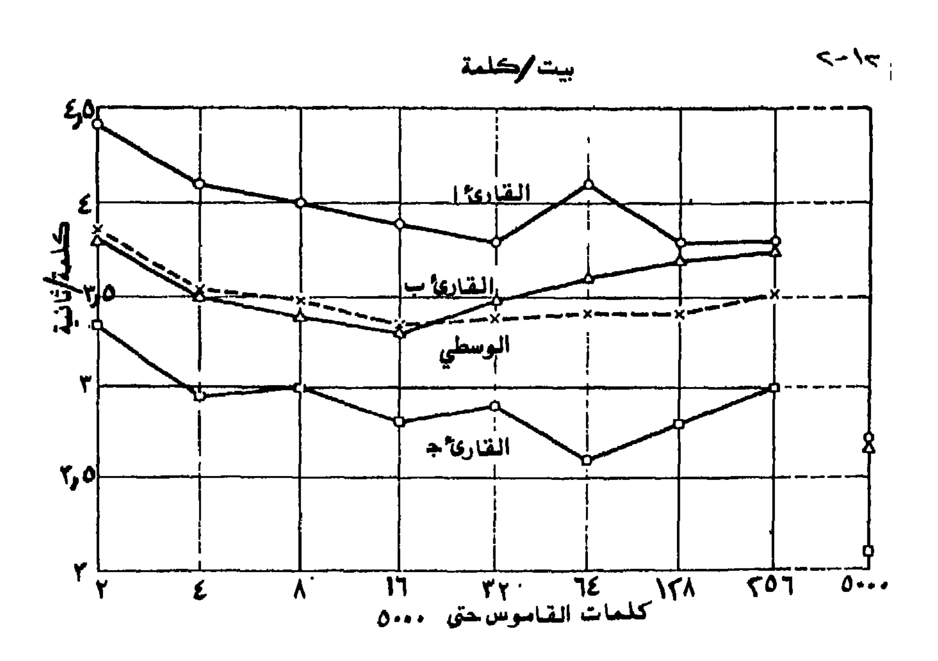
يتناسب ازدياد زمن الاستجابة في تجربة هايمان مع الريبة في المنبه مقاسة بالبيت . الا ان التجارب المختلفة التي اجراها علماء متميزون افضت الى نتائج متباينة . واكثر من ذلك . فقد أوضح كل من ج. هـ. موبراي و م. ف. رودس عام ١٩٥٩ ، انه بعد كثير من المران يتغير اداء الشخص بحيث يصبح زمن الاستجابة مستقلا عن المحتوى المعلوماتي . يبدو ان الكائنات الانسانية تمتلك طرائق متعددة لتناول المعلومات ، فهناك طريقة تستخدم في التعليم حيث يلعب عدد البدائل دورا مهما ، وطريقة اخرى تبرز بعد قطع مراحل كبيرة من عملية التعلم حيث يختزل دور البدائل الى نطاق محدود . بل ويبدو اثر كمية المعلومات في تجربة اخرى محددا منذ البداية ، حيث يجب على الشخص المختبر ان يضغط مفتاحا أو اكثر من اصل عدة مفاتيح تلمسها اصابعه بمجرد احساسه باهتزاز المفتاح أو المفاتيح المعينة .

وأكثر من ذلك ، اذا كان زمن الاستجابة مساوياً فعلا لكمية ثابتة يضاف اليها زيادة ما مناسبة للمحتوى المعلوماتي ، فانه يبقى من غير الاكيد ان نحصل على سرعة معلوماتية هامة بقسمة الوقت على عدد واحدات البيت . سنرى ان ذلك سيفضي الى سرع معلوماتية خيالية من خلال التجربة التي سأعرضها فيما يلي .

اجرى هـ كواستلار تجارب مبكرة على السرع المعلوماتية حيث كان على الشخص المختبر ان يعرف سلاسل عشوائية من القطع الموسيقية كما اجرى ج. س. بر. ليكلايدر تجارب على سرعة القراءة والتأشير . بدات مع ج. اي. كارلين ، وقبل علمنا بهذه الانجازات ، سلسلة من التجارب حول قراءة قوائم من الكلمات ، وهي تعطي بالمقارنة مع النوعيات الاخرى من التجارب ، اكبر سرعة معلوماتية ملحوظة ، مثلا أكبر من سرعة ارسال رموز مورس ومن سرعة الطبع بالآلة الكاتبة .

نفرض ان المرسل يختار ابجدية مؤلفة مثلا من ١٦ كلمة ثم يعمد الى اعداد قائمة باجراء خيارات عشوائية من بين هذه الكلمات وعلى اساس احتمالات متساوية . تساوي كمية الخيار في هذه الحالة ولكل كلمة لع ١٦ = ٤ بيت . يبث الشخص المختبر المعلومات عبر ترجمتها الى شكل جديد هو شكل الخطاب بقراءته القائمة بصوت مرتفع . فاذا كان بامكانه مثلاً القراءة بسرعة ٤ كلمات في الثانية يكون بامكانه بث المعلومات بسرعة ٤ × ٤ = ١٦ بيت في الثانية .

يوضح الشكل ١٢ ــ ٢ المعلومات الخاصة بثلاثة اشخاص مختبرين . وقد تم انتقاء الكلمات الخمسمائة الاكثر استخداما في اللغة الانكليزية . يلاحظ انه بينما تنخفض سرعة القراءة نوعا ما بالتحول من القاموس اللغوي ذي الكلمتين الى القاموس ذي الاربع كلمات (أو من ١ الى ٢ بيت لكل كلمة) ، تبقى هذه السرعة ثابتة تقريبا للقواميس التي تحتوي من ٤ الى ٢٥٦ كلمة (او من ٢ الى ٨ بيت لكل كلمة) .



الشكل ١٢ ــ ٢

نستذكر الآن طريقة استخراج السرع المعلوماتية من معلومات كتلك التي عالجها هايمان ، أي ملاحظة الازدياد في الوقت المقابل لازدياد كميات المعلومات المقــدرة بالبيت بالنسبة للمنبه . لندقق في الخط الوسطي المتقطع من الشكل ١٢ ــ ٢ . لا تتناقص سرعة القراءة اطلاقا بالتحول من ٢ بيت للمنبه الى ٨ بيت للمنبه ، اي ان التغير في زمن القراءة لكل كلمة هــو صفر ، رغــم الازدياد في الكم المعلوماتي بمعدل ٦ بيت لكل كلمــة اذا قسمنا ٦ على صفر نحصل على سرعة معلوماتية تســاوي اللا نهاية طبعاً هذا مضحك ، ولكنه لا يبقى كذلك في حالة استنتاج السرعة بطريقة هايمان اي بقسـمة ازدياد الكم المعلوماتي مقدرا بالبيت على زيادة زمن الاستجابة .

نستنتج مباشرة من الشكل ١٢ ــ ٢ ان القارىء آ يقرأ الكلمات المؤلفة من ٨ بيت بسرعة ٣٫٨ في الثانية ، وهكذا فهو يبث المعلومات بسرعة ٨ × ٣٫٨ = ٣٠ في الثانية . واكثر من ذلك ، عندما يتم اختيار كلمات القائمة وبشكل عشوائي من قاموس يضم ٥٠٠٠ كلمة (١٢٫٣ بيت لكل كلمة) ، فانه عند ذلك سيقرأ بسرعة ٢٫٧ في الثانية محققاً سرعة معلوماتية اكبر هي ٣٣ بيت في الثانية .

يتضح انه لا توجد سرعة معلوماتية وحيدة يمكن ربطها باداء الكائن البشري ، اذ أن باستطاعة هذا الكائن بث المعلومات (وكما سنرى فيما بعد الاستجابة لها او تذكرها) في شروط معينة بشكل افضل من حالة شروط اخرى . واحسن صورة يمكننا ان نكونها عن الانسان أنه قناة او جهاز ناقل للمعلومات له خصائص وقدرات محددة . الا انه جهاز في منتهى المرونة اذ بامكانه تناول المعلومات باشكال عدة واحسن مايكون عليه هذا التناول في حالة كون المعلومات مرمزة بشكل مناسب لقابلياته .

ما هي هذه القابليات ؟ نقرأ من الشكل ١٢ ــ ٢ أن الانسان يبطىء بكميات طفيفة لدى ازدياد التعقيد ، فهو يستطيع قراءة قائمة من الكلمات مختارة بشكل عشوائي من ابجدية فيها ٢٥٦ كلمة تقريبا بنفس السرعة في حالة ابجدية فيها ٤ كلمات فقط . انه ليس بسرعة الآلات ، ولكي نحسن من ادائه علينا مطالبته بتنفيذ مهمات معقدة . هذا هو ما كان ممكناً ان نتوقعه .

لا ان التعقيد سيبطنه في النهاية ، كما نرى في حالة الابجدية المكونة من ٥٠٠٠ كلمة . ربما ان هناك ابجدية مثلى لكل كلمة فيها عدد من وحدات البيت ، وبحيث ان عدد الكلمات لن يبطىء عملية القراءة بشكل ملحوظ . قمت انا وكارولين ، في محاولة منا لايجاد هذه الابجدية ، بقياس سرعة القراءة بدلالة عدد المقاطع ودلالة الاعتياد اي فيما اذا كانت الكلمة منتقاة من الكلمات الالف الاولى الاكثر شيوعاً أو من الكلمات العشرة آلاف الاولى . يوضح الشكل ١٢ ــ ٣ هذه التجارب .

ا القارئ ا

الاعتياد

٥ ١ - ١٠٠٠

△ ١٠٠٠٠ - ١١٠٠٠

□ ١٩٠٠٠ - ٢٠٠٠٠

ب القارئ ب

ج القارئ ج

٥ ٤,٥ ٤ ٣,٥ ٣ ٢,٥ ٢ ١,٥

١ ٢ ٣ ٤ ٥

كلمات في الثانية

عدد المقاطع لكل كلمة

الشكل ١٢ - ٣

يلاحظ انه بينما يؤدي ازدياد عدد المقاطع الى انخفاض سرعة القراءة يؤدي نقص الاعتياد الى نفس النتيجة تقريبا . وهكذا فقد يكون القاموس المعتاد والمكون من الكلمات وحيدة المقطع هو الانسب . استطاع احد القراءة تحقيق سرعة قراءة مساوية لـ ٣ر٧ كلمة في كل ثانية ، اي ٤٢ بيت في كل ثانية باستخدام قاموس مؤلف من الكلمات الوحيدة والاكثر استخداماً او اعتياداً والبالغ عددها ٢٥٠٠ كلمة (٢٥٠٠ كلمة يعني ٣ر١١ بيت لكل كلمة) .

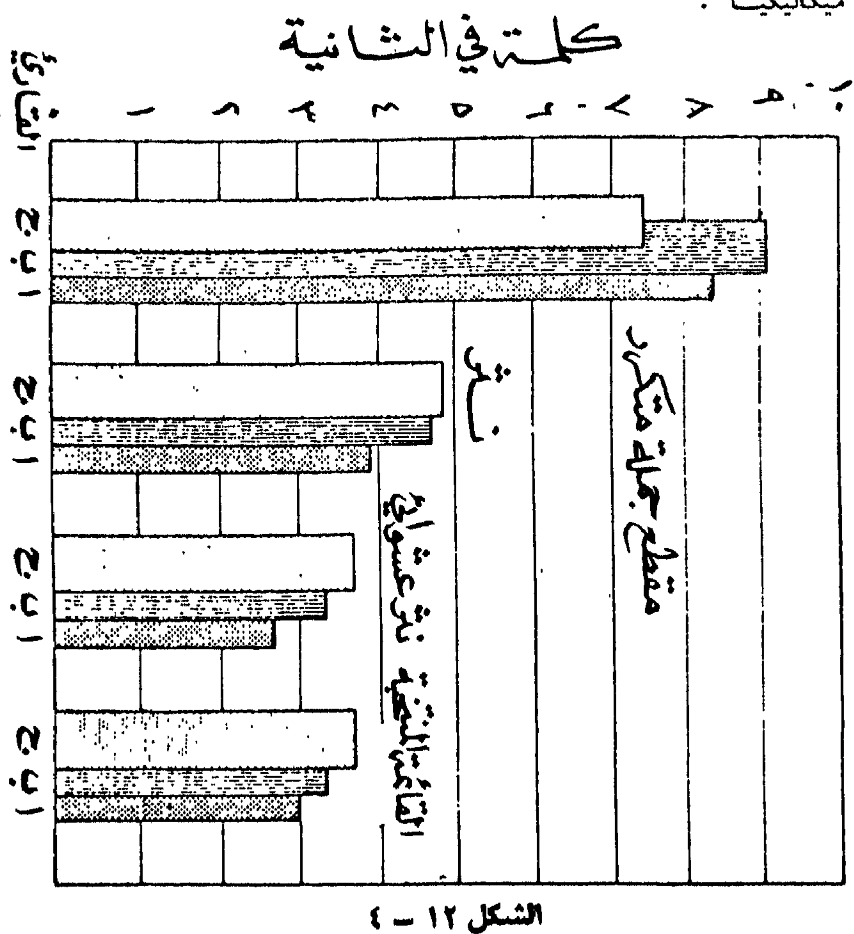
تملك الفقرات النترية المكتظة ، اي تلك النصوص التي تنتقى كلماتها على اساس تكافؤ الاحتمال ودون روابط اعرابية ، سرعة معلوماتية عالية كحالة النصوص غير التكنيكية . وتساوي الانتروبي في حالتها ٨ر١١ بيت لكل كلمة وسرعة القراءة ٧ر٣ كلمة في الثانية والسرعة المعلوماتية المقابلة ٤٤ بيت في الثانية .

اعتقد أننا نستطيع احراز كسب ما بتحسين الابجدية ، إلا أن هذا الكسب سيكون غير ذي اهمية. وعلى كل حال ، اعطت هـذه التجارب على سرع معلوماتية أمكن الحصول عليها ، وهي سرع صغيرة وفق معايير الاتصالات الكهربائية ، الا أنها مع ذلك تمثل عدداً كبيراً من الخيارات الثنائية ، حوالي ٢٥٠٠ في الدقيقة .

ما هو الشيء الذي يحد من هذه السرعة ؟ هل هو قراءة الكلمات حرفاً بحرف ؛ اذا كان الامر كذلك ، تعتبر اللغة الصينية أحسن لغات العالم لان فيها شارة معينة لكل كلمة ، الا أن الصينين الذي يقرؤون قوائم عشوائية . من الاحرف الصينية ومقابلاتها من الكلمات الانكليزية يفعلون ذلك بنفس السرعة .

هل يمكن أن تكون القيود على السرعة ميكانيكية الطابع يوضح الشكل ١٢ ــ ٤ السرع لمهام مختلفة اذ يبين كيف يستطيع احد الاشخاص استظهار مقطع بضعف سرعته في قراءة مقطع عشوائي التركيب منتقاة

كلماته من قائمة معينة ، واخيرا فسرعته اكبر ما يمكن في قراءة نص منثور وهكذا اذا ظهرت بعض المحدودية في القراءة فسببها سيكون عقلياً وليس ميكانيكيـاً .



الشكل ١٢ ــ ٤

يبدو حتى الآن اننا لن نستطيع تمييز الانسـان بسرعة معلوماتية معينة ، اذ بينما تزداد صعوبة مهمة معينة بزيادة محتواها المعلوماتي ، فان هذه الصعوبة تتوقف ايضا على قابليات الانسان في مجال معين . يتمتع الكائن الانساني بمرونة كبيرة في قابلياته ، الا انه يتعرض لاجهادات قوية ويبطىء لدى تصديه للمشـاكل الكبيرة وهو بصورة عامة بالغ الكفاءة في المجالات المعقدة الا انه بطيء السرعة بشكل عام .

تعتمد تنمية القابليات الانسانية في مجال معين على التجارب المدروسة المخططة بشكل جيد . تشبه هذه العملية ترميز الرسائل من مصدر رسائل معين بهدف تحقيق اكبر سرعة بث للمعلومات عبر قناة ذات ضجيج ، وقد سبق ان بحثنا ذلك في الفصل الثامن ، واسمينا السرعة العظمى عندئذ بسعة القناه . لقد تم انشاء القائمة المنتجة من الكلمات والتي تضمنت الكلمات الـ ٢٥٠٠ الاولى الاكثر شيوعاً والمؤلفة من مقطع واحد ، عبر محاولة هادفة لتحقيق سرعة معلوماتية عالية لقراءة مجموعات عشوائية من الكلمات بصوت مرتفع .

يجدر بنا ان نلاحظ ان انتقاء كلمات النصوص بشكل عشوائي مع الاخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورودها الطبيعية يفضي الى سرعة معلوماتية اكبر بقليل . هل من الممكن أن تكون كلمات لغة معينة وتواتر ورودها قد وفقا على نحو ما مع القابليات الانسانية عبر عملية طويلة من الاختيار اللاواعي المتطور .

رأينا في الفصل الخامس أن احتمال ورود كلمة في النصوص الانكليزية يتناسب مع تواترها ، أي أن الكلمة ذات الترتيب مئة في تواتر ورودها اقل باحتمال ورودها بمئة مرة بالمقارنة مع الكلمة الاكثر شيوعاً . سبق ان اوضح الشكل ٥ ــ ٢ هذه العلاقة التي اشار اليها للمرة الاولى جورج كينغسلي زيبف وعزاها الى مبدأ الجهد الاقل .

ان قانون زيبف لا يمكن ان يكون صحيحاً بشكله البسيط هذا فقد عرفنا في الفصل الخامس الى أن حساب احتمال ورود الكلمات ما تقدم لا يمكن ان يكون مطلق الصحة ، اذ لو تحقق ذلك لكان مجموع الاحتمالات اكبر من الواحد . لقد جرت محاولة لتعديل واشتقاق وشرح قانون زيبف بشكله الاصلي والابسط على انه توصيفه تقريبي للسلوك الانساني ازاء اللغة ، وقد توصل زيبف الى هذا القانون بشكل تجريبي عبر اختبار احصائيات النصوص الفعلية .

كما قدمنا ، ربط زيبف قانونه بمبدأ الجهد الاقل . لقد تركزت الجهود لربط الطاقة الموظفة أو الثمن اللازم لانتاج النصوص مع عدد الاحرف في النصوص . يعتبر اللغويون ان اللغة هي اولا اللغة المنطوقة ، ويبدو من غير المحتمل ان تكون عادات القراءة والكتابة والنطق قد نشأت على هامش عدد الاحرف اللازمة لتكوين الكلمات .

لاحظنا فعلا ان تجارب السرع المعلوماتية التي اعتبرناها للتو تفضي الى حقيقة مفادها ان سرع القراءة هي نفسها للمقاطع الصينية وللكلمات الانكليزية المقابلة المبينة من الاحرف الهجائية ورأينا من خلال الشكل ١٢ ــ ٣ كيف يؤثر كون الكلمة اعتيادية او دارجة على سرعة القراءة مثلما يؤثر عدد المقاطع .

الا يمكننا اعتبار وقت القراءة كمعيار للجهد ؟ قد يجنح تفكيرنا مثلا الى الاعتقاد بأننا نستطيع التعامل مع الكلمات الاكثر شيوعا بسهولة أكبر اي اننا نتذكرها ونستخدمها بجهد أو ثمن ادنى بالمقارنة مع الكلمات الاقل شيوعاً . ربما ان تنظيم الدماغ الانساني يقوم على نوعين من التخزين : الاول يهدف الى الاسترجاع السهل للكلمات ، بينما تستعاد الكلمات في النوع الثاني بصرف جهود كبيرة ويتميز الاول بتغطيته عددا قليلا من الكلمات وحسب . نميل عند هذه المرحلة الى فكرة أن وقت القراءة هو مقياس لسهولة التناول ، او الثمن المطلوب .

لنتخيل اكثر من ذلك ؛ بان الكائنات الانسانية تستخدم اللغة بطريقة تسمح ببث المعلومات باكبر كمية ممكنة مقابل ثمن معين ، فاذا اعتبرنا ان هذا الثمن هو زمن النطق ، نستنتج أن الانسان يسعى لنطق أكبر كمية ممكنة من الكلمات خلال زمن محدد .

يؤدي استخدام مبادىء رياضية بسيطة الى برهان علاقة ترتبط باعلى سرعة معلوماتية ممكنة ، اذ لتحقيق مثل هذه السرعة في حالة رسالة مكونة من كلمات مختارة بشكل عشوائي ، يجب أن يتم هذا الاختيار وفق احتمال قدره ح (ر) معطى بالعلاقة :

$$ح(ر) = ٢^{-ث\, ز_ر}$$

حيث $ز_ر$ هو زمن قراءة الكلمة ذات الترتيب ر في قائمة الكلمات الاكثر شيوعا ، و ث هو ثابت نختاره بشكل يصبح مجموعة الاحتمالات كلهـا مساويا الواحد . تقول هذه العلاقة ان الكلمات المرتبطة بوقت قـراءة طويل ستستخدم بتواتر اقل من تلك ذات وقت القراءة القصير ، وهـذه العلاقة صحيحة بقدر رغبتنا في الحصول على سرعة معلوماتية اعظمية .

اذا كان قانون زيبف صحيحا ، يجب ان يساوي الاحتمال (ر) حيث

$$ح(ر) = \frac{آ}{ر}$$

آ هو ثابت آخر . ينتج من هاتين المساواتين ان :

$$\frac{آ}{ر} = ٢^{-ث\, ز_ر}$$

وبالعودة الى بعض الشروح في الملحق ، نصل من هذه العلاقة الـى علاقة اخرى هـي :

$$ز_ر = ب + حـ لع ر$$

هنا ب ، حـ ثابتان يحددان باختيار العلاقة بين زمن القراءة ز ر والترتيب وفق الاعتياد ر ، اذ أن العلاقة الاخيرة يجب أن تكون صحيحة للقراءات التجريبية فيما اذا كان قانون زيبف صحيحا وكانت السـرعة المعلوماتية تصل حتى نهاية عظمى في حالة الانتقاء العشوائي والمستقل للكلمات وفق الاحتمال الوارد في قانون زيبف .

لا تنتقى الكلمات بشكل عشوائي ومستقل عند انشاء النصوص اللغوية الفعلية ، لذا لا نستطيع التاكيد بأن الكلمات المنتقاة وفق قانون زيبف

ستصل بالسرعة المعلوماتية الى قيمة عظمى . الا انه من المفيد والممتع ان نحاول معرفة مدى صحة التنبؤات القائمة على اساس الاختيار العشوائي والمستقل للكلمات ، خاصة في حالة قراءة النصوص اللغوية .

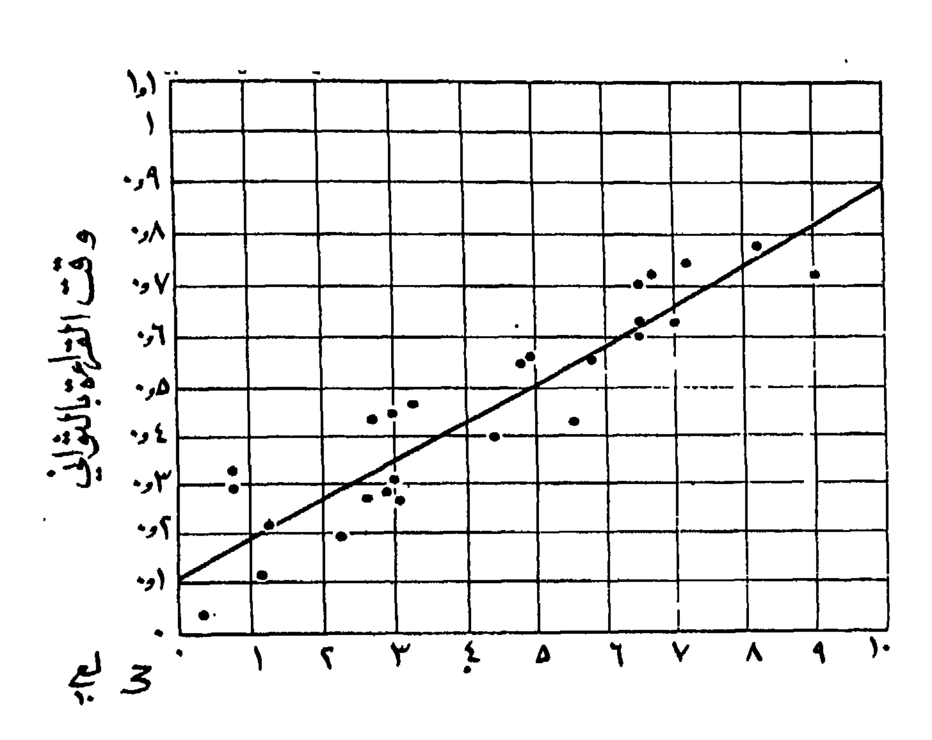
عالج الرياضي بنويت ماند لبروت هذا الموضوع من خلال المعلومات الخاصة بوقت القراءة التي جمعها عالم النفس التجريبي د. هـ هوز ، وقد عرف ماندلبروت باهتمامه في اللغويات . وقد حاولت بنفسي مقارنة العلاقة الاخيرة مع السلوك الانساني الفعلي بمساعدة المجرب الخبير في مجال علم النفس الفيزيائي ر. ر. ريزس .

هناك صعوبة حقيقية في اجراء مثل هذه المقارنة . يبدو واضحا ان سرعة القراءة تقيد بامكانية تمييز الكلمة وليس بنطقها ، اذ يمكن لانسان ما ان ينطق كلمة طويلة معروفة ، بينما يحدق في كلمة اخرى قصيرة وغير معروفة محاولا تمييزها . يمكن الالتفاف حول هذه الصعوبة باجراء عملية توسيط وذلك عبر قياس الزمن الكلي اللازم لنطق ثلاثة كلمات متتالية ومن ثم مقارنة هذا الزمن بالزمن المحسوب من العلاقة الاخيرة .

انجز ريزس هذا العمل ولخص نتائجه في الشكل ١٢ ــ ٥ . ينطوي الاختبار على محاولة الشخص القراءة باسرع ما يمكن . تمثل العلاقة الاخيرة خطا مستقيما ، اما النقاط التجريبية في الشكل ١٢ ــ ٥ فهي اكثر انتشارا من ان يجمعها خط مستقيم .

كان علينا ان نتوقع مثل هذا الانتشار اذ اننا قمنا بعملية تجيير التواتر الطبيعي للكلمات في النصوص الفعلية الى خبرة الشخص الموضوع تحت الاختبار ، كما رأينا من الشكل ١٢ ــ ٣ امكانية تاثير طول الكلمة على سرعة القراءة ، واخيرا فقد اهملنا تماما العلاقة بين الكلمات المتتالية .

يثير هذا النوع من التجارب الغضب فعلا ، اذ يمكن أن نستقرىء ما يمكن اجراؤه هذه التجارب ، الا أن كلاً منها يحتاج لوقت طويل ، كما



الشكل ١٢ ـ ٥

أننا لا ندري فيما اذا كانت ستتمخض عن نتائج ذات قيمة حدية . ربما أن عبقريا ما سيكشف عن الحقيقة في أحد الايام ، الا أن عالم النفس المتحفظ يجنح لجعل عمله واعدا بنتائج اكيدة لا جدل حولها .

يوحي العمل السابق ، على الاقل ، بأن الاقتصاد في الجهد يحكم استخدام الكلمة ، وان الاقتصاد في الجهد يعني الاقتصاد في الوقت . اننا مازلنا في حيرة فيما اذا كان هذا ناتج القابليات المدربة للتلاؤم مع اللغة أو فيما اذا كانت اللغة نفسها تصبح أكثر تناغما مع القابليات الفكرية لبني البشر . ما عساه يكون أمر عدد الكلمات التي نستخدمها ، مثلا ؟

يقيس بعض الباحثين أحيانا المعجم اللغوي للكاتب بمجموع الكلمات المختلفة في أعماله ؛ والمعجم اللغوي بشكل أعم لاي انسان بمجموع الكلمات المختلفة التي يفهمها . الا أن الكلمات النادرة وغير العادية تشكل في حقيقة الامر نسبة ضئيلة من مفردات اللغة . يبرز عند هذه المرحلة السؤال التالي : وما هو عدد الكلمات التي تشكل معظم اللغة ؟

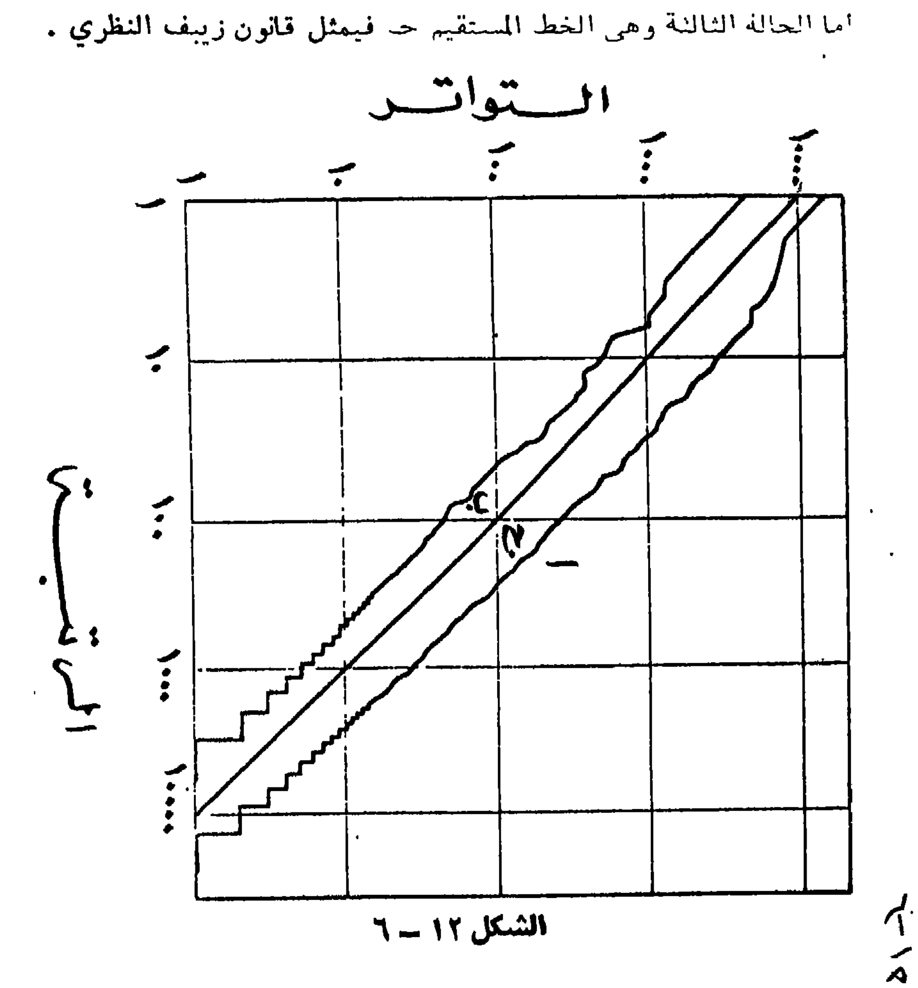
قد يذهب البعض للتأكد بأن عدد الكلمات المستخدمة يعكس تعقيد الحياة ، فما نحتاجه من المفردات في مدينة كبيرة لا يفيدنا في قرية صغيرة ولكننا على كل حال نملك حرية الخيار بين استخدام كلمة جديدة للدلالة على شيء ما أو جملة من كلمات شائعة للدلالة على نفس الشيء ، كأن نقول مثلا التلفزيون أو الجهاز الذي يرينا ما تبثه اجهزة اخرى بعيدة ، هنا كلمة التلفزيون الاولى تشير الى شيء معين ولها استخدام متخصص بينما الكلمات في الجملة الاخرى : الجهاز ، الذي ، يرينا ، ما ، تبثه ، اجهزة ، اخرى ، بعيدة ، فلها استخدامات اخرى ايضا .

وهكذا نستطيع انشاء لغة اصطناعية بعدد أكبر او اقل من الكلمات بالمقارنة مع اللغة الاصلية ونستطيع بواسطتها قول نفس ما نقوله باللغة الاصلية . يمكننا ان نذهب ابعد من ذلك اذا شئنا فنعتبر أبجدية اللغة كلغة مختزلة بحد ذاتها يمكننا ان نترجم اليها اي نص لغوي . .

ربما تجنح كل اللغات لامتلاك معجم اساسي تفرضه قابليات تنظيم الدماغ البشري باكثر مما يفرضه التعقيد الظاهري للمحيط . يضيف عادة المتميزون والمبدعون من بني البشر الى هذه اللغة الاساسية عدداً من الكلمات الخاصة وغير المتواترة بقدر ما يرغبون أو يتذكرون .

درس زيبف هذه القضية من خلال المخططات الموضحة لقانونه . يوضح الشكل ١٢ ــ ٦ علاقة تواتر الكلمة بدلالة درجة شيوعها اي كما اشرنا سابقاً كم هي اعتيادية هذه الكلمة ورتبة اعتيادها . يعطي الشكل ثلاثة حالات : الأولى فقرة من عمل أوليس لجيمس جويس ولعدد من

الكلمات مساو ل ٢٦٠٤٣٠ كلمة ، والثانية ل ٤٣٩٨٩ كلمة مأخوذة من الصحف، حيث أشير للحالة الاولى بالحرف آ وللحالة الثانية بالحرف ب . اما الحالة الثالثة وهى الخط المستقيم حـ فيمثل قانون زيبف النظري .



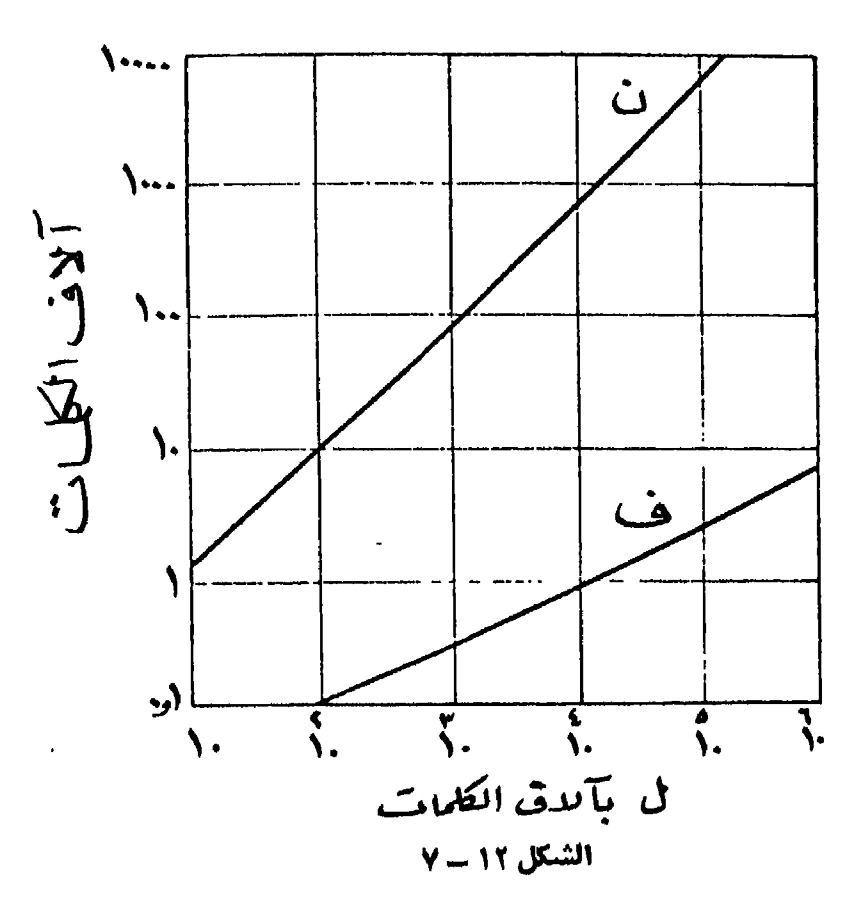
الشكل ١٢ ــ ٦

يتحدد ارتفاعا آ و ب بعدد الكلمات في العينة ، في حين ان ميل المنحنيين ، وهو الشق الثاني المهم ، فيرتبط بطول العينة . اما القسم المتدرج في الزاوية اليمنى السفلى من المنحنيين فيعكس حقيقة ورود بعض الكلمات غير المألوفة مرة ربما أو مرتين او اكثر ؛ ولكن ليس ٥ر١ مرة أو ٦٧ر٢ مرة .

عندما نحاول توفيق كل من المنحنيين الى المستقيم حـ المائل بزاوية ٥٤٥ ، نجد ان العوامل الهامة في الموضوع تتعدى موضوع الميل . نبدأ قياس التواترات بالكلمات التي ترد مرة واحدة ، هنا تمثل الزاوية اليمنى السفلى تواتر ورود مساوياً الواحد . كذلك يبدأ محور الرتب بالعدد ١ المقابل لأكثر الكلمات استعمالا . وهكذا يبدأ كل من المحورين بالعدد ١ ثم يظهر كل منهما نفس التقسيمات ايضاً لتمثيل نفس الازديادات في الأعداد . يتضح من الشكل ان الخط الممثل لقانون زيبف يعكس حقيقة مفادها أن عدد الكلمات المختلفة في العينة يجب أن يساوي عدد مرات ورود أكثر الكلمات استخداماً .

نذهب أبعد من ذلك فنقول : اذا كان قانون زيبف صحيحاً في صيغته الأولية هذه فان نصف عدد الكلمات في العينة ستكون مساوية للجذر التربيعي لعدد الكلمات المختلفة في الفقرة المعتبرة . يعطي الشكل ١٢ ـ ٧ العلاقة بين عدد الكلمات المختلفة ن وعدد الكلمات ل في الفقرة المعتبرة ، وكذلك العلاقة بين ف عدد الكلمات المكونة لنصف الفقرة وعدد الكلمات فيها ل .

تنعكس هنا محدودية مفرطة في معجم المفردات ، اذ تشكل ١٧٠ كلمة نصف فقرة جويس ، كما يؤكد الشكل ١٢ ـ ٦ نفس الحقيقة بالنسبة للكتابات الصحفية . يؤكد زيبف ان قانونه يصلح للغة الجرمانية القديمة اذا شمل تعداده كل ما يحتل موضع كلمة من النص ، وكذلك مختلف اللهجات الجرمانية ، وان ظهرت بعض الشذوذات في القسم اليساري الأعلى من الخط الممثل للقانون . تجنح المنحنيات الممثلة للغة النروجية لأن تكون اكثر حدة في القسم الأيمن الاسفل بالمقارنة مع القسم الايسر الاعلى ، كما تعطي لغات أخرى خطاً يساوي ميله ثلاثة ارباع خط زيبف . يعني ذلك عدداً أكبر من الكلمات المختلفة في نص معين ؛ اي معجماً أكبر . اما في حالة اللغة الصينية ، فيرتفع المنحني فجاة في أعلى اليسار دالا على مفردات اكثر .



الشكل ١٢ ــ ٧

ومهما يكن من أمر ، تعكس هـذه الدراسة التشابه بـين مختلف اللغات ، اذ يتشابه توزع واحتمال الكلمات أن لم يكن في كل اللغات ففي معظمها ، فلربما توائم اللغات نفسها مع قابليات العقل الانساني وتنظيمه ومبناه ، ولربما أن كل انسان يلاحظ ويعبر عن نفس عدد التظاهرات في محيطه ، فانسان الأسكيمو يستخدم مفردات مختلفة للتعبير عن أنواع متباينة من الثلج . على كل حال تشترك كل اللغات في سمة واحدة هي محاولة تصغير الجهد المبذول لتحقيق الاتصالات الانسانية . نؤكد هنا أن هذه النتيجة ليست نهائية بحال من الاحوال .

وجهت انتقادات حادة لعمل زيبف . فأنا مثلا أعتقد أن من المستحيل ان يلعب طول الفقرة ، وبصرف قانون النظر عن المؤلف ، العامل الرئيسي في تحديد عدد الكلمات المختلفة . طبعاً يثبت قانون زيبف حقيقة هامة وهي أن تواتر ورود الكلمات لا يتغير بطول العينة . يذهب بعضهم الى التصور بأن صحة قانون زيبف ، أكثر ما تظهر لعينات طولها بحدود ١٢٠٠٠٠ كلمة ، وأنه في عينات أصغر تتواتر كلمات لا ترد الا مرة واحدة ، بينما في العينات الاكبر يتضاءل عدد الكلمات وحيدة الورود . وهكذا يبدو من المعقول أن سبب تشابه معجمي جويس والصحف اليومية هو أن الصحف مؤلفة من قبل عدد كبير من الكتاب .

اقتصر تناولنا لقانون زيبف حتى الآن على اعتباره ملائماً للمعلومات التجريبية بشكل تقريبي ومن ثم على التساؤل عما نستطيع فعله بعد ذلك . الا أن هناك منظوراً آخر لهذا القانون ، اذ يمكن أن نبرهنه على ما هو عليه انطلاقاً من فرضيات بسيطة تتعلق بتوليد النصوص . لقد أعطى عدد من الباحثين مثل هذا البرهان وكان أهم ما قدم في هذا المجال هو عمل الرياضي ماندلبروت الذي اتينا على ذكره ، ويبدو أنه ذهب الى ابعد من حدود هذا البرهان ايضاً .

يعطي ماندلبروت اشتقاقين مختلفين . يفرض في الأول أن النص ينتج من سلسلة من الاحرف والفراغات المنتقاة بشكل عشوائي وباحتمالات غير متساوية ، كما في التقريب الأول للنصوص اللغوية في الفصل الثالث . يسمح ذلك بعدد لا نهاية له من الكلمات المختلفة المؤلفة من سلاسل من الاحرف مفصولة عن بعضها بسلاسل من الفراغات .

يبين ماندلبروت ، استناداً لهذا الفرض فقط ، أن احتمال ورود هذه الكلمات ح (ر) يمكن حسابه من العلاقة :

$$ح (ر) = ث \times (ر + ف)^{-ب}$$

حيث ر هو ترتيب الكلمة المعنية وفق تصنيف الكلمات الدارجة ، المعتادة أو الأكثر استخداما . اما ب ، ف فهما ثابتان يمكن حسابهما اذا عرف احتمال كل كلمة وكل فراغ في النص . واخيراً تحدد قيمة ث على اساس جعل مجموع كل الاحتمالات مساوياً للواحد الصحيح .

نلاحظ هنا انه اذا كان ف صغيراً و ب تقريباً واحد فان العلاقة الأخيرة تقترب من قانون زيبف . وبالمقارنة مع الخط المستقيم لقانون زيبف فان هذه العلاقة تعطي منحنياً أكثر حدة في اعلى اليسار واقل انحداراً في اسفل اليمين . بقي أن نقول إن هذا المنحني يلائم معلومات النصوص الفعلية اكثر مما يلائمها قانون زيبف .

لقد تم التاكيد على كلٌ حال بان طول الكلمات المنتجة بالعملية العشوائية الموصوفة لا تقابل طول الكلمات في النصوص اللغوية الفعلية .

ولا بد من الاشارة ايضاً الى ان اللغات لها مظاهر غير عشوائية ، اذ تقصر الكلمات كلما تواتر استخدامها . هل لنا الحق اذن بأن نتبنى صحة قانون زيبف لمجرد ان الانشاء العشوائي للكلمات يقود الى كلمات تحقق هذا القانون . واقع الامر اننا سنمتلك هذا الحق اذا توفر لنا ما يؤكد بأن انتاج النصوص الفعلية يخضع لعشوائية مشابهة .

يفترض ماندلبروت في اشتقاقه الثاني لقانون زيبف ان تواتر الكلمات يجب أن يصل بالسرعة المعلوماتية الى قيمة عظمى من اجل ثمن معين . يعتبر كحالة بسيطة وخاصة ان لكل حرف ثمناً معيناً وأن ثمن الكلمة ، أي ثمن سلسلة من الاحرف تنتهي بفراغ ، يساوي مجموع اثمان الأحرف المكونة لها . تقود هذه الافتراضات ماندلبروت الى صيغة مماثلة لاشتقاقه الأول وان كان معنى الثوابت الواردة مختلفاً هذه المرة . فمثلا يمكن ان يكون الثابت ب اقل من الواحد اذا كان مجموع عدد الكلمات المسموح بها نهائياً .

يمكننا استخدام العلاقة الاخيرة وتوفيقها بانسب شكل مع المعلومات التجريبية وذلك بان نتوقف عن البحث عن معان ملائمة للثوابت الواردة فيها ، وان نعطي تلك الثوابت قيماً تحقق هذا التوفيق التجريبي ، وهذا سيكون اجود على الصعيد الفعلي من محاولة الاقتراب من قانون زيبف المقابل للقيم : ب = ١ ، ف = ٠ . يبقى على كل حال حتى هذا التطبيق موائماً لأكبر عدد ممكن من الحالات باستثناء عدد قليل منها . وفي بعض الاشتقاقات اللغوية المعاصرة تكون قيمة ب الاقل من الواحد هي الانسب .

يقول ماندلبروت ان غنى المعجم اللغوي تعكسه قيمة ب ، فاذا كانت هذه القيمة اكبر من الواحد فان عدد الكلمات المكررة ينخفض ، واذا كانت قريبة من الواحد فان تنوعا كبيراً من الكلمات يظهر في مجال الاستخدام . ويضيف ماندلبروت انه ينمو الطفل تتناقص قيمة ب من ١٫٦ حتى ١٫١٥ او ربما حتى ١ واذا كان الطفل هو جيمس جويس نفسه .

تؤكد ملائمة العلاقة الاخيرة للمعلومات التجريبية اكثر من قانون زيبف ، وهي تتجاوز الاعتراض المنبثق عن قانون زيبف بان احتمال الـ التعريف انما يعتمد على طول العينة المجتزاة من لنص . لا يعني ذلك بالطبع صحة شتقاق ماندلبروت للعلاقة الاخيرة بشكل مطلق ، اذ من المحتمل ان تكون هناك علاقة رياضية اخرى أكثر تماشياً مع المعلومات التجريبية . ويحتاج الامر الى دراسة أعمق للحصول على اجوبة نهائية .

ينطبق قانون زيبف على جمل معلوماتية غير تلك المتعلقة باستخدام الكلمات ، مثلا في حالة عدد سكان مدينة معينة بالمقارنة مع حجم هذه المدينة . وهكذا نجد في المدينة العاشرة في الترتيب من حيث المساحة عشر عدد السكان الموجودين في اكبر مدينة ، وهكذا .

الا ان هذا الانطباق قد لا يعدو كونه تصادفيا . يخضع مثلا الجذب الثقالي بين جسمين لقانون عكس المربع ، وكذلك شدة اضاءة الشمس على

بعدين مختلفين منها ، الا انه لا يوجد قانون عام يمكن ان يفضي الى هاتين الحالتين الخاصيتين في شروط معينة .

ان قابليتنا لاستقبال ومعالجة المعلومات محدودة اصلا بالامكانات المتواضعة لجملنا العصبية . ويمثل هذه الحقيقة وقانون ٧ زائد أو ناقص ٢ لجورج . آ . ميلز . يذهب هذا القانون الى انه بامكان كل انسان بعد فترة قصيرة من الملاحظة ان يتذكر ويعيد اسماء عدد من الاشياء المعتادة يساوي من ٥ الى ٩ من هذه الاشياء ، كالارقام العشرية او الثنائية ، الاحرف ، أو الكلمات الدارجة .

نعرض صورة ضوئية امام شخص لفترة قصيرة ، ثم نريه عدداً من حبات الفاصولياء السوداء ، فيكون بمقدوره اعلامنا عدد العدد الصحيح حتى ٩ حبات . وهكذا فبامكان ومضة واحدة نقل عدد من الامكانات مساو لعشرة ، مثلا من . وحتى ٩ ، والمعلومات المنقولة في هذه الحالة لع ١٠ = ٣ر٣ بيت .

أما اذا عرض امام نفس الشخص عدد من الأرقام الثنائية فسوف يتذكر منها بشكل صحيح ما مجموعه ٧ ارقام ، اي انه تم نقل كم معلوماتي مساو لـ ٧ بيت .

واذا كانت المادة المعروضة امامه هي الاحرف الابجدية ، فسيستعيد منها اربعة او خمسة ، ان اي الكم المعلوماتي في هذه الحالة سيساوي ٥ × لع ٢٦ = ٢٣ بيت .

يمكن لنفس الشخص ان يتذكر ثلاثة او اربعة كلمات قصيرة دارجة اي اقل بقليل من ٧ — ٢ = ٥ اذا اختيرت هذه الكلمات من اصل الـ ٥٠٠ كلمة الاكثر شيوعا ، فتكون كمية المعلومات : ٣ × لع ٥٠٠ = ٢٧ بيـت .

وكما في حالة التجارب على سرعة القراءة فان الربح المترتب على التعقيد الاكبر يتجاوز الضياع الناجم عن الفقرات الأقل ، حيث تزداد المعلومات بازدياد التعقيد .

وهكذا تفضي تجارب سرعة القراءة وقانون ميلر الى نتائج مربكة . اذا كان الانسان يتلقى ٢٧ بيت من المعلومات من صورة معينة ، فهل نستطيع بالمقابل بث صورة باستخدام ٢٧ بيت من المعلومات بحيث أن اسقاط تلك الصورة على الشاشة سيظهرها كصورة فعلية معتادة واذا كان بمقدور الانسان بث ٤٠ بيت من المعلومات في الثانية كما تؤكد ذلك تجارب سرعة القراءة فهل نتمكن من ارسال صورة تلفزيونية أو صوت بجودة عالية وباستخدام ٤٠ بيت من المعلومات في الثانية .

اعتقد أن الاجابة في كلا الحالتين هي النفي . ما هو الخطأ اذن ؟ يكمن الخطأ في اننا قسنا ما يخرج عن الانسان لا ما يدخل اليه . ربما أن بامكان الانسان ملاحظة ٤٠ بيت من المعلومات الهامة في الثانية الا أن لديه الخيار الكامل فيما سيلاحظه . فمثلا يمكن ان يتابع فتاة معينة أو يكتفي بالنظر الى ملابسها ، وربما يلاحظ ماهو أكثر من ذلك الا أن هذه الملاحظة سرعان ما تتبدد قبل أن يصيغها في توصيف معين .

درس عالما النفس أي . آفرباك و ج. سبرلنغ هذه المشكلة بشكل مشابه ، فقد اسقط كل منهما عدداً كبيراً من الاحرف على شاشة (١٦ أو ١٨ حرف) ، وبعد اقل من ثانية نبها الشخص المختبر باشارة معينة عن الحرف الذي يجب ان يذكره . اذا استطاع ذلك فلا شك أن كل الاحرف قد انطبعت في داخله لان الحرف المعني قد انتقي بشكل عشوائي .

تؤكد نتائج هذه التجارب ان ما تخزنه العضوية من المعلومات في جزء من الثانية يتجاوز ٧ + ٢ او ٧ ــ ٢ كما ورد في قانون ميلر ، ويبدو أن ٧ + ٢ أو ٧ ــ ٢ من هذه المعلومات تتحرك الى مخزن دائم مـن

الذاكرة بسرعة بند معلوماتي واحد في كل جزء من مائة جزء من الثانية ، أو ما يساوي اقل من عشر الثانية لكل البنود . تستطيع الذاكرة الاخيرة هذه تخزين المعلومات لعدد من الثواني . يبدو ان حجم هذه الذاكرة هو المسؤول عن قانون الـ ٧ + ٢ او ٧ — ٢ لميلر .

ان بامكاننا البحث عن علاقات جديدة بين نظرية المعلومات وعلم النفس بشكل مستمر . وقد اخترت من هذا المحيط الواسع بعض النقاط القليلة وحسب . وسيبقى السؤال قائماً : هل حقاً ان نظرية المعلومات هامة بهذا القدر بالنسبة لعلم النفس ، او ان هذه النظرية تقتصر على تنظيم الممكن ، من حيث المبدا ، باستخدام واسطة اخرى غير نظرية المعلومات . اعتقد شخصياً أن نظرية المعلومات قد زودت علماء النفس بمنظور جديد عن عملية الاتصالات وعن مدى تعقيدها واهميتها كما ان هذه النظرية قد حركت علماء النفس ودفعتهم لاعادة تقييم المعلومات القديمة والبحث عن معلومات جديدة . ويبدو لي اضافة لذلك انه بينما تلعب نظرية الاتصالات الدور الرئيسي في الاتصالات الكهربائية ، تقتصر مجال علم النفس على دور جذاب وحسب . واخيراً تضيف هذه النظرية عبارات جديدة ومبهرة في مجالات متعددة .



الفصل الثالث عشر

نظرية المعلومات والفن

عندما زار موسيقي معاصرو استاذ الموسيقى منذ عدة سنوات مختبرات بيل ، دهش لسماعه ان كل الاصوات الموسيقية وكل التراكيب الموسيقية يمكن اختزانها الى سلاسل عددية . اما بالنسبة لعلماء الاتصالات فلم يكن هذا الا من سقط المتاع ، اذ ان استخدام تعديل ترميز النبضات يمكن من تمثيل اي موجة كهربائية او صوتية بسلسلة من عينات من السعة .

يبدو ان علماء الاتصالات قد تنبهوا الى بعض النقاط التي لم تكن لتهم الموسيقي . يلزم للتمثيل الجيد للموسيقى ذات عرض الحزام ١٥،٠٠٠ هـ. ف ث. استخدام ٣٠،٠٠٠ عينة في كل ثانية لا تقل دقة كل منها عن ٠،٠٠١ ، وهذا ممكن اذا وظفنا ثلاثة ارقام عشرية او عشرة ارقام ثنائية لتوصيف سعة كل عينة .

يستطيع المؤلف ممارسة حرية الاختيار بين الأصوات بشكل مطلق اذا هو اعتبر ٣١٠،٠٠٠ عدد عشري مكون كل منها من ثلاثة ارقام في كل ثانية . سيسمح له ذلك بالانتقاء بين المؤلفات البالغ طولها حوالي عشرين دقيقة والتي يمكن كتابتها على شكل واحد متنوع بعدد من الاصفار مساو لـ ١٠٨ مليون صفر ، وهو عدد كبير للغاية . بكلمة اوضح يستطيع المؤلف ممارسة اختيار مكافىء لـ ٣٠٠،٠٠٠ بيت في الثانية .

نتحسس هنا بعض الخطأ . فقد سبق وعرضنا الى أن الكائن الانساني لا يستطيع تجاوز سرعة معلوماتية قدرها ٤٠ بيت في الثانية مهما اتبع من اساليب كمحاولته القراءة بصوت مرتفع . هذه السرعة اقل بكثير من السرعة التي منحناها للمؤلف الموسيقى .

وأكثر من ذلك ، فليس بمقدور الانسان أن يتلقى ويقيم من المعلومات ما يتجاوز ٤٠ بيت في الثانية ، فعندما نصغي لممثل معين نسمع غامضاً من الكلام بسرعة متوسطة .

اشرنا الى الحرية والمرونة التي يمتلكها المؤلف في التعبير عن مؤلفه كسلسلة من العينات ، ونضيف ان مثل هذه الحرية تهدر على نطاق واسع ، اذ ان مثل هذه الحرية والمرونة تمكنان المؤلف من انتاج مجموعة من المؤلفات ستبدو للمستمع غير مهمة وغير محببة . ان الضجيج الغاوسي الابيض المحتوي كل التواترات على قدم المساواة هو من وجهة نظر رياضية محصلة التنوع وعدم التوقع . ان اكثر الاصوات اصالة هي اقلها توقعاً . الا ان الضجيج الغاوسي الابيض بكل اشكاله له نفس الواقع على الكائن الانساني ، اذ تختفي خصائصه عن احاسيس الانسان الذي يحكم ان ما يسمعه ذي وتيرة واحدة وباهت .

اذا كان حكم الانسان على ما هو شديدة التنوع وقليل التوقع من وجهة النظر الرياضية يتلخص بكونه على وتيرة واحدة ، اذن فما هو الشيء الذي سيجده مستحدثاً وممتعاً . اذا كان الشيء جديداً فيجب أن يكون قابلا للتمييز عما هو قديم ، واذا كانت الاصوات قابلة للتمييز ، فيجب أن تكون مألوفة الى حد ما .

نستطيع ان نجد في اصدقائنا المقربين ما هو مميز في كل منهم بينما لا يكون وضع الغرباء مشابهاً . يمكننا ان نميز بين الصيني والافريقي بالطبع ، الا اننا سنجد صعوبة بالغة في التمييز بين الصينيين انفسهم ، وبنفس الطريقة نميز بين الضجيج الغاوسي والموسيقي الرومانسية ، الا أن هذا لا يمنحنا قاعدة واسعة للتنوع ، فكل الضجيج الغاوسي يبدو متماثلا بالنسبة الينا .

تبدو معظم المؤلفات الموسيقية للقرن الثامن عشر متماثله بالنسبة لعشاق المؤلفين الرومانسيين ، وكذلك يبدو بالنسبة اليهم مؤلف ادوارد غريغ المسمى : مقطوعة هوليبرغ مماثلا لموسيقى القرن الثامن عشر وان كان في واقع الامر مشابهاً لها بشكل ظاهري فقط . تبدو موسيقى الكورال من القرن السادس عشر رتيبة وغير مميزة حتى بالنسبة لعشاق القرن الثامن عشر . اعلم ان هذه القاعدة تعمل بشكل معاكس ايضاً اذ ان بعض انصار موتزارت يجدون فردي مما بينما يجد المتحمسون لتنوع الموسيقى عند فردي مجرد صخب وضجيج في الموسيقى المعاصرة .

يرغب المؤلف بأن يكون حراً واصيلاً ، الا انه يرغب ايضاً بان يكون معروفاً . اذا لم يستطع متذوقوه التمييز بين اعماله فلن يقبلوا على شراء تلك الاعمال ، واكثر من ذلك إذا لم يستطيعوا تمييز اعماله عن جملة اعمال المؤلفين آخرين ، فسيكتفوا عند ذلك بتسجيل واحد كممثل للمجموع .

كيف يستطيع المؤلف اذن جعل مؤلفاته مميزة بالنسبة الى الجمهور؟ ربما بالحفاظ على سرعتها المعلوماتية والانتروبي الخاصة بها ضمن حدود القابليات الانسانية للتمييز . يمكن للمؤلف المذكور تحقيق هدف التمييز ايضاً بتنويعه للانتاج ضمن سرع تكافيء عدد من واحدات البيت في الثانية ، وبذا يتمكن الآخرون من ملاحظة الاختلاف بين اعماله .

هل يعني ذلك ان بامكان المؤلف الحاسب ، اي نظري المعلومات والمؤلف في نفس الوقت ، انتاج متتالية بسيطة وبطيئة من النوتات الموسيقية المنتقاة بشكل عشوائي . كلا بالطبع ، تماماً كما هي حال الكاتب اذا انتقى سلاسل من الاحرف بشكل عشوائي . ان ما سيفعله المؤلف الموسيقي هو اشادة عمله على واحدات اكبر مالوفة بالنسبة للجمهور من خلال الخبرة المتكونة عبر الاستماع الى المؤلفين الآخرين . وستكون هذه الواحدات مرتبة بشكل يمكن المستمع الى حد ما من توقع اللحن التالي دون وضعه خارج المسار طول الوقت . ربما أن المؤلف

سيحاول مفاجئة المستمع بين حين وآخر ، الا انه لن يفعل ذلك على الدوام ، كما ان المؤلف سينجح الى تقديم ماهو جديد ولكن بمعدلات ضئيلة ، وسيعمل على تعويد المستمع على هذا الجديد ومن ثم تكراره بعد فترة في ثوب مغاير .

يستخدم المؤلف الموسيقي لغة يعرفها المستمع ، تماما كما هي الحالة في اللغة العادية . اذ ينشا سلاسل مرتبة من الكلمات الموسيقية وفق قواعد موسيقية اعرابية دقيقة . يمكن ان تكون هذه الكلمات انغام متآلفة او مدرجة ، او لحن رئيسي او تزييني . وسوف تتالى في جمل مكررة بشكل نسيق تنطق بها آلات الاوركسترا . اذا كان المؤلف حاذقاً فسينجح في نقل مشاعره الشخصية المميزة الى المستمع المرهف . واذا كان في الحد الادنى حرفيا فسياتي مؤلفه معتدلاً ومقبولاً .

لم نات بجديد حتى الآن ، اذ ان بامكان حتى اولئك البعيدين عن نظرية المعلومات اعادة ما قلناه في جمل مختلفة . الا انه يبدو لي على كل حال أن هذه الحقائق ستكون اكثر اهمية عندما يواجه المؤلفون الموسيقيون وغيرهم من الفنانين التنوع الهائل في المصادر التكنيكية المثيرة والمخيفة نوعاً ما .

سينزعون للوهلة الاولى الى الاختيار الحر المستند الى قاعدةعريضة. لقد دهش م. ف. ماثيوز من مختبرات بيل ازاء قدرة الكومبيوتر على خلق أي تشكيل موجي استجابة لبعض التعليمات المغذاة اليه ، لذا عمد الى تصميم برنامج يميز كل نوتة موسيقية على بطاقة معينة وفق شكل موجتها ، زمنها ، خطوتها ، وعلوها . انتقل ماثيوز مدفوعاً بفرح غامر الى مطالبة الكومبيوتر بانتاج مقاطع وسيقية لم تعزف وكان ذلك، ومع أن المقاطع المنتجة كانت بسيطة الا انها كانت فوضوية .

يستطيع المؤلفون الكبار من امثال فاريسيه تحريك المشاعر بشكل ونمط معين وذلك عن طريق مزج كل انواع الاصوات المسجلة والمعدلة

وفق المدرسة الواقعية في الموسيقى . لقد انتجت عدة اعمال موسيقية باستخدام الامكانات الالكترونية ، الا ان المؤلفين مازالوا يعانون من صعوبات كبيرة عند تخليهم عن المصادر التقليدية .

اذا رغب المؤلف بالحفاظ على جمهوره فما عليه الا تبسيط مؤلفاته وكتاباتها بالطرق التقليدية ، كما أن بامكانه وغيره من المؤلفين تربية وتثقيف الجمهور بحيث يصبح من الممكن تذكر وتمييز المصادر الجديدة لاعمالهم ، او أن على المؤلف مواجهة خيار آخر ببقائه مغموراً وانتظار الاجيال القادمة بهدف اصدار حكم عادل عليه . على كل حال تبقى هناك خيارات أخرى خاصة اذا كان المؤلف عبقرياً .

هل لدى نظرية المعلومات ما يمكن أن تمنحه الى الفنون ؟ اعتقد أن ليس لديها الا القليل مما هو مهم فعلاً لعرضه باستثناء وجهة نظر وهي وجهة نظر مهمة سنخصص لها ما تبقى من هذا الفصل .

تناولنا اللغة في الفصل الثالث والرابع والثاني عشر . تتألف اللغة من ابجدية او معجم من الكلمات اضافة لاحكام او قيود قواعدية تتعلق بكيفية استخدام الكلمات وربطها ببعضها . لقد تعلمنا التمييز بين مظاهر النصوص المتنوعة التي تفرضها القواعد والمعاجم اللغوية وتطرقنا كذلك الى الحرية الفعلية التي يمارسها الكاتب أو الناطق . وتأكدنا ان عنصر الخيار هذا هو المسؤول الوحيد عن القيمة المتوسطة للمعلومات في كل كلمة . وبينا كيف توصل شانون الى حساب هذه القيمة بما يتراوح بين ٣ر٣ الى ٢ر٧ بيت لكل كلمة . يشكل هذا الخيار ايضاً القاعدة الصلبة التي يتمكن الكاتب أو الناطق بالاستناد اليها من نقل الافكار والمعاني التي يرغبها .
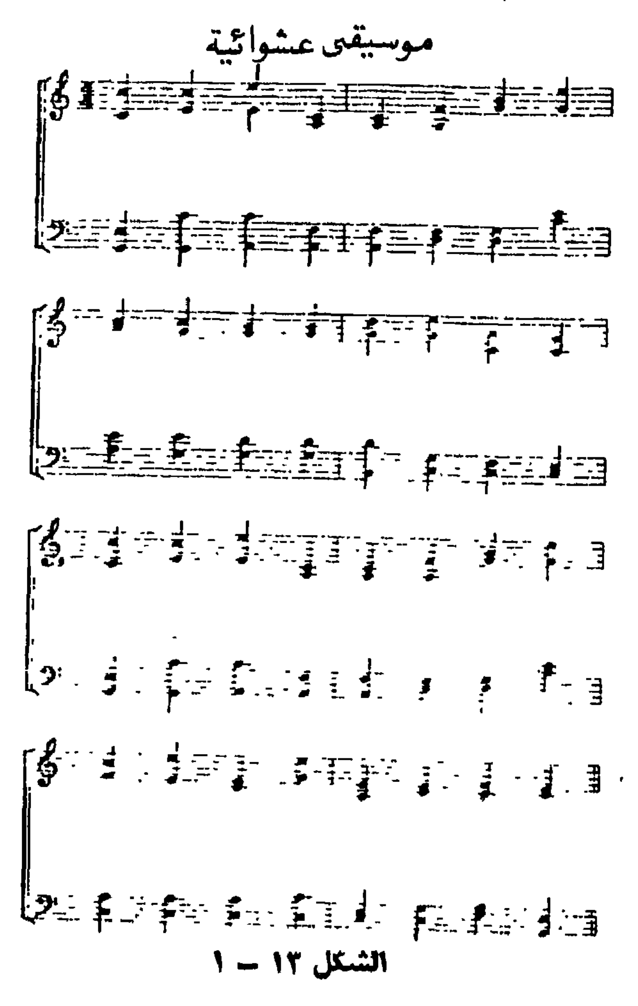
تتسم المعاجم اللغوية بكونها واسعة ، على الرغم مما سبق وأوضحناه في الفصل الثاني عشر من ان عدد قليل من الكلمات فقط يشكل الجزء الاكبر من اي نص . اما القواعد اللغوية فهي من الصعوبة بمكان لدرجة انها لم تصغ بشكل كامل حتى الآن . ومع ذلك ، يمتلك الكثيرون معاجم لغوية واسعة ويحيطون بالقواعد بشكل يمكنهم من الانشاء اللغوي المتميز .

نجد من المعقول أن نفرض وبشكل مماثل معرفة واسعة بالعناصر الموسيقية من قبل من يصغون للموسيقى في تامل وتذوق عاليين . لا يعني ذلك ان نطالب مثل هذا المستمع بصياغة القواعد الموسيقية ، مثلما نحجم عن مطالبة الكاتب ببناء أحكام القواعد اللغوية ، وكذلك ليس من الضروري أن يؤلف الموسيقى وفق القواعد باكثر مما قد يطلب من ابكم يفهم ما يسمع في مجال النطق . ومهما يكن من أمر فسيبقى لديه حد أدنى من المعارف الموسيقية يستطيع بواسطتها فهم ما يسمع .

كان هذا هو ما اردته عندما اشرت الى معرفة لغة الموسيقى او اسلوب الموسيقى ، اي على وجه التحديد معرفة عناصر وأحكام الموسيقى لامة أو فترة محددة ، او مدرسة موسيقية معينة . وسواء اذا كانت الاحكام الموسيقية مستندة أو غير مستندة الى قوانين الفيزياء فان الالمام بهـا يحتاج الى سنوات طويلة من التدريب المضني كما هو الامر في حالة اللغة المنطوقة . ان المامنا هـذا هـو الوحيد الكفيل بتمييز أسلوب وخصوصية عمل معين سواء أكان أدبيا او موسيقيا . تبدو الاصوات الموسيقية للأذن غير المدربة وكانها منتقاة من عدد لا نهاية له من الاصوات الممكنة وليس فقط من قطاع محدد من الاصوات المعروفة ، وكذلك ستبدو لنفس الاذن القواعد الموسيقية ممثلة للخيار والتنوع . وهكذا سيهزم التعقيد الموسيقي الجمهور غير المدرب أو الجمهور الذي تعود لغة موسيقية مخالفة .

يجب أن نتذكر أن بامكاننا كتابة جمل ذات معنى حتى لو خالفنا القواعد اللغوية . يشبه وضع الموسيقى ذلك اذ ان بامكاننا تقدير موسيقى غريبة نوعاً ما بالنسبة لخبراتنا . وبالمقابل يمكننا كتابة جمل صحيحة من حيث القواعد الا انها لا تحمل بين ثنياتها اي معنى محدد ، ساقف عند هذه الامكانية الاخيرة للحظة . علينا اولاً أن نلاحظ انه في نفس الوقت الذي يمكننا فيه كتابة جمل ذات معنى وصحيحة وفق قواعد الاعراب ، الا أن ذلك غالباً ما يعرضنا لتحديق الآخرين في نقص كفاءاتنا كوننا كنا واضحين في التعبير .

لن يكون جديداً اذا استغنينا عن المعنى بشكل كامل مع ابقاء معجم معقول وبعض او كل القواعد . وهكذا زود موتزارت الاجيال بفواصـــل موسيقية في $\frac{3}{8}$ الزمن اضافة لمجموعة من القواعد . اذا عمدنا الى قذف النرد للحصول على سلسلة من الارقام العشوائية وانتقاء الفواصل وفق القواعد فاننا سنتستطيع تأليف عدد لا نهاية له من مقطوعات الفالس حتى لو افتقرنا الى الخبرة في التأليف الموسيقي ، وستبدو مؤلفاتنا شبيهة بموتزارت غير منظم . يعطي الشكل ١٣ ـ ١ مثالاً في هذا المعرض .



الشكل ١٣ ـ ١

يقال أن بعض المؤلفين الكبار قاموا بتأليف موسيقى غير منظمة من هذا الطراز ، ومنهم جوزيف هايدن ، ماكسيميليان ستارلر ، وباخ . استخدم جون كيج وهو مؤلف متاخر العمليات العشوائية لانتقاء سلاسل من النوتات الموسيقية .

قمت انا وزوجة كلود شانون عام ١٩٤٩ ، ودون أن ندري بالاعمال العشوائية المشار اليها بتأليف موسيقى ابتدائية احصائية أو عشوائية . نظمنا اولاً جدولاً بالانغام المسموحة في المقامات ١ ــ ٤ من مفتاح سي . لقد تضمن الجدول في الحقيقة انغام المقام ١ فقط اذ استخرجت الانغام الباقية من هذه وفق قواعد محددة . تم انجاز عدد من المؤلفات باستخدام جداول للاعداد العشوائية وقذف ثلاثة احجار نرد صنعت خصيصاً .

كانت القاعدة الوحيدة المستخدمة في هذه المؤلفات لربط الانغام مع بعضها ، هي قاعدة ربط النغمين اذا كان لهما نفس اللون في نفس الطبقة . لقد جعل هذا الشرط بقية الانغام تقفز هنا وهناك بشكل غير مرضٍ . يقابل ذلك استخدام الاحتمالات البسيطة وغير الصحيحة في انشاء النصوص كما سبق والمحنا في الفصل الثالث .

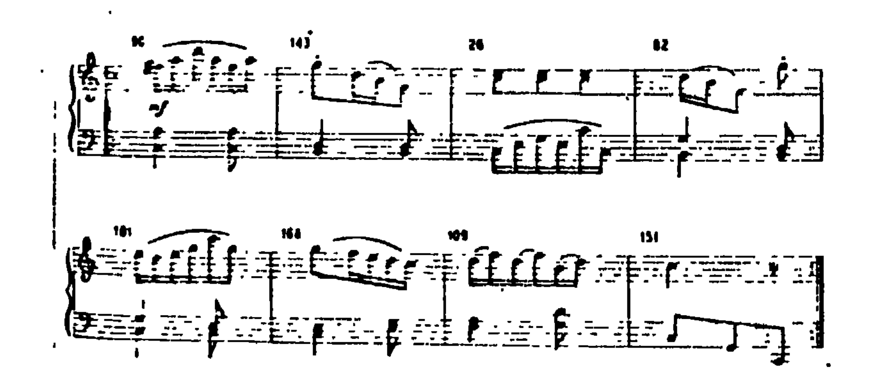
وعلى الرغم من التشكيل القصير المدى لهذه المؤلفات البدائية فقد حاولنا أن نجعلها معقولة ومقبولة وقابلة للتذكر ، بل وذات مدى بعيد .

وهكذا فقد تكون كل مؤلف من ثمانيـــة مدرجات بمقياس $\frac{٤}{٤}$ ،

وتم التوصل الى المدى البعيد بجعل المدرج ٥ مكرر المدرج ١ والمدرج ٦ مكرر المدرج ٢ ، بينما اختلف المدرجان ٣ و ٤ عن المدرجين ٧ و ٩ . اذن فالمؤلفات كانت من نوع الروندو الابتدائي . كما تم تصنيف الانغام ١ ، ٦١ ، ٣٢ في المقام الاول بينما الانغام ١٥ ، ٣١ اما في المقام الرابع او الخامس . وذلك بهدف اظهار اثر ايقاعي .
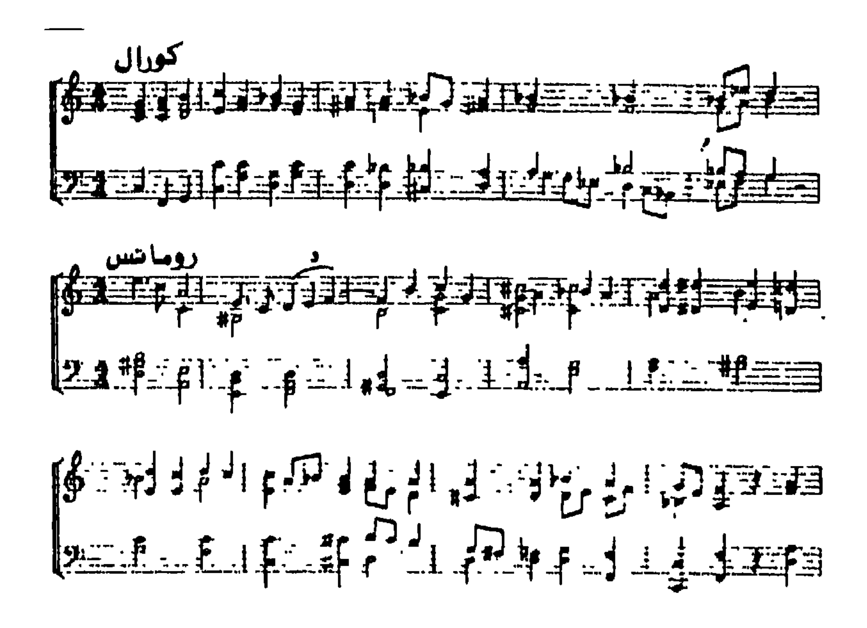
لقد شابهت مؤلفاتنا التراتيل ، على الرغم من انها روندو اصوائية . يبين الشكل ١٣ ـ ٢ احد هذه المؤلفات ، وقد ذهبنا ابعد من ذلك بتحديد كلمات لهذه التراتيل ، وكل المؤلفات الاخرى تشبه ذلك الموضح في الشكل ١٣ ـ ٢ وهي بالطبع من تاليف نفس الملحن ، الا انها بعد عدد من مرات الاستماع ستبدو مختلفة . ومن الطريف حقاً انني بدات اتعلق بهذه الموسيقى بعد سماعي اياها لمرات كثيرة . ولاشك انها ستقع بشدة على اذني موسيقي مرهف .

قام دافيد سليبيان ، وهو عالم معلومات سبق أن ذكرناه ، بعمل آخر عام ١٩٥١ . فقد استخدم ، باتباع شانون ، المعلومات الاحصائية عن الموسيقى المتوفرة لدى علماء الرياضيات الذين يفتقرون للخلفية الموسيقية . عرض على الشخص المختبر ربع علامة ، نصف علامة ، او ثلاثة انصاف العلامة من مؤلف موسيقي وطلب منه اضافة نصف علامة معقولة ، ثم ابرز المحصلة الى شخص آخر طالباً منه اضافة نصف علامة اخرى وهكذا . وسبق ان اخبر هؤلاء الاشخاص بطابع المؤلفات الموسيقية المعنيـــة .



الشكل ١٣ ـ ٢

قدمت في الشكل ١٣ ـ ٣ نموذجين ، الاول موسيقى كورالية بنيت على أساس اضافة نصف علامة استناداً لنصف العلامة السابق ، والثاني موسيقى رومانسية انشأت باضافة نصف علامة بالاعتماد على الانصاف الثلاثة السابقة . اعجب في الواقع وبشدة كيف أن هذين المؤلفين يظهران كما هما عليه رغم عدم الانسجام والتوافق بين الانغام المتتالية فيهما . ان طابع الموسيقى في هذين العملين ملفت النظر ايضاً ، فعلى ما يظهر كان لدى الرياضيين أفكار قليلة عما يناسب الموسيقى الرومانسية وعما يناسب موسيقى الكورال .



الشكل ١٣ ـ ٣

توضح تجارب سليبيان مرونة الكائن الانساني واخطاؤه . صحيح أن العمليات العشوائية تبدو متسقة الا أنها باهتة وعديمة الروح ، وقد استخدم بعضها في التأليف الموسيقي .

الا ان ليس من شك في قدرة الكومبيوتر على انتاج موسيقى عشوائية تشبه موسيقى مؤلف معين اذا غذي منذ البداية ببعض الاحصائيات المميزة لطابع هذا المؤلف يوضح هذه الامكانية طابع موسيقى الحضانة المبتكر من قبل بينكرتون وتنوع الطوابع المستحضر من قبل هيلر وايزاكسون والتي سأتعرض لها فيما يلي .

نشر ريتشارد . س . بينكرتون عام ١٩٥٦ في مجلة العلم الامريكي بعض القواعد البسيطة لكتابة الالحان . اوضح بينكرتون كيفية اختيار علامة موسيقية على اساس احتمال ورودها بعد علامة معينة ، ومدى تغير هذه الاحتمالات بتغير الموقع في المدرج الموسيقي . كما حسب الانتروبي لكل علامة باستخدام الاحتمالات المستخرجة من طابع موسيقى الحضانة ووجدها مساوية لـ ٢٫٨ بيت ، واعتقد شخصياً ان هذا الرقم اكبر مما يجب . اعتبر بينكرتون آلة متناهية الحالات بامكانها انتاج الحان عادية ، كما فعلت نفس الآلة في الشكل ٣ ــ ١ عندما انشات الجُمل اللغوية .

استند كل من بروكس ، هوبكنز ، نويمان ، ورايت الى موسيقى التراتيل ونشروا بحثاً عام ١٩٥٧ حول الجانب الاحصائي للتاليف الموسيقي .

اعلنت مؤسسة بوروز عام ١٩٥٦ انها عهدت للكومبيوتر بتاليف الموسيقى ، كما اعلن عام ١٩٥٧ أن الدكتور بوليشو والدكتور كلاين استخدما كومبيوتراً كبيراً لتاليف الالحان الموسيقية . وقد الف جاك . اوينز كلمات لاحد هذه الالحان وأذيعت من التلفزيون الامريكي فعلاً . وقد حذا الكثيرون هذا الحذو في التاليف الموسيقي .

ومهما يكن من امر فان التاليف الموسيقي الجدي بواسطة الكومبيوتر لم يشاهد النور الا على يد هيلر وايزاكسون من جامعة الينوي ، فقد نجح هذان العالمان في صياغة قواعد النوعيات الاولى من اربعة اقسام والتي مكنت الكومبيوتر من اختيار النوتات الموسيقية بشكل عشوائي الا اذا خالفت القواعد حيث كان الكومبيوتر يرفضها .

اقتصرت القواعد على العلاقات المباشرة بين ثلاثة نوتات متتالية باستثناء الايقاع الختامي ، لذا تراوحت الموسيقى عبر مجالات واسعة، وان كانت جيدة ضمن مجالات ضيقة ، لا بل كانت مدهشة احيانا في تلك المجالات . يوضح الشكل ١٣ ــ ٤ نموذجاً من هذه الموسيقى .

خاتمة

الشكل ١٣ ــ ٤

ذهب هيلر وايزاكسون ابعد من ذلك في محاولتهما اثبات قدراتهما على جعل الكومبيوتر يؤلف الحاناً ديناميكية ومتناغمة وكذلك على تحقيق التاليف الموسيقي وفق سلاسل ماركوف ، حيث يتم الاختيار المتتالي للنوتات الموسيقية استناداً لتوابع احتمالية محسوبة بدورها من جداول منظمة وفقاً لاعتبارات التناغم الموسيقي . انتج العالمان بذلك خواتم موسيقية جيدة .

لقد جمع هذا العمل الموسيقي وبيع تحت اسم مقطوعة إلياك لرباعي وتري ، وكما اوضحنا فلهذا العمل خصائص متميزة في مقاطعة المحلية الا انه ضعيف وشديد التراوح اذا اخذ ككل . ولو فرض على العمل نموذج معين أو كررت فيه بعض المقاطع لتحسن بشكل ملحوظ . ان لهذا طابعاً تقريرياً حاسماً تماماً في التكرارات في موسيقى الروندو ، او كما هو الامر في قواعد شومسكي التي شرحناها في الفصل الرابع . يجب ان نتوقع على كل حال استحالة تاليف موسيقي ذي مدى واسع بمجرد استخدام النوتة السابقة او ربما عدة نوتات سابقة في حساب احتمال النوتة التالية ، فالعلاقة المطلوبة يجب أن تربط أجزاء العمل وليس النوتات المفردة .

يؤكد عمل هيلر وايزاكسون أن بامكان الكومبيوتر تاليف بعض الاعمال الموسيقية التي كانت مقصورة على الانسان فيما مضى . اضف الى أن بعض المؤلفين غير الموهوبين قد يلجأون للكومبيوتر لدى كتابتهم لاعمالهم الموسيقية ؛ وما يفعله احدهم هنا هو توجيه التاليف العام وترك مهمة ملىء التفاصيل الكومبيوتر . كما انه يمكن استخدام الكومبيوتر لتجريب قواعد جديدة للتاليف قد يصعب على المؤلف للوهلة الاولى تجربتها والاعتياد عليها .

نسمع في هذه الايام أن علم السيبرنيتيك سيتحفنا بآلات يمكنها أن تتعلم . اذا كان بامكان هذه الآلات أن تتعلم بأسلوب صعب بكل ما تعنيه هذه الكلمة ، فلماذا لا تتعلم ما نرغب منها أن تتعلمه حتى عندما نكون عاجزين عن معرفة انفسنا . وهكذا اذا فرضنا على الكومبيوتر نظام مكافآت وعقوبات تبعاً لنجاح محاولاته أو فشلها ، نستطيع اذ ذاك وضعه في شروط تمكنه من انتاج موسيقى اسبانية أو كلاسيكية وفق هوانا . لاشك أن هذه الافكار مثيرة للغاية ، وقد تبدو عديمة المعنى في عصرنا وربما ستبقى كذلك لعدة مئات قادمة من السنين .

ليست الموسيقى هي كل الفن ، وان كنت قد بدات بها فلأنها تعرض بشكل غير عادي بعض الافكار المشتقة من نظرية المعلومات ، علماً بأن

المرور على هذه الافكار كان من الممكن انجازه باستخدام اللغة ، وقد كان للتجارب العشوائية مع اللغة شان كبير في تعزيز بعض الاستنتاجات المتعلقة بنظرية المعلومات .

قام بروفسور من الاكاديمية ألكبيرة لاغودا باطلاع الكابتن لوموييل غوليفر على اطار من الكلمات مؤلف من مجموعات من الاحرف مرصوفة بشكل معين . عمد البروفسور بعد ذلك لخلط هذه الاحرف وانصرف الى تامل الحكمة الكامنة وراء تشكيلات الكلمات الجديدة .

عرضنا هنا التطبيق الخاطىء للعمليات العشوائية في توليد النصوص، اذ لن يزيد هذا معلوماتنا بأي قدر ، فمن ذا الذي سيأخذ العمليات العشوائية غير الموثوقة على محمل الجد . واقع الامر انه يوجد عدد كبير من العبارات غير الاساسية ؛ وما نحتاج معرفته هنا هو : ما هو كذلك وما هو ليس كذلك .

تفضي العمليات العشوائية ، رغم ذلك ، الى نتائج مثيرة ، ففي الفصل الثالث عرضنا التقريبات المتتالية للغة وفق شانون حيث اعتمد الانشاء تواتر ورود الاحرف المفردة والتراكيب المؤلفة من حرفين أو اكثر وكذلك جداول معتمدة للاعداد العشوائية . وقد رأينا في حينه احتواء هذه التقريبات على كلمات ذات معنى أو كلمات معقولة بشكل ما في حدها الادنى .

نذكر القارىء بطريقة انشائنا للنصوص وان المعاني تبدأ بالظهور وتستمر لدى استخدامنا مجموعة من اربع كلمات ننطلق منها لاكمال النص باضافة كلمة في كل مرة ثم اعتبار الكلمات الاربعة الاخيرة وهكذا . ورغم ذلك لا يبقى للنص ككل سياق واحد بل يراوح عبر مجالات متباينة، والسبب هو انعدام الخط العام الموجه لتاليف النص وانتقاء الكلمات بالتالي . نلاحظ وضعاً مشابهاً عند الاشخاص المصابين بانفصام الشخصية . يعرض و. هـ. هدسون نموذجاً يمثل خروجاً عن السياق

ومراوحة على لسان احد ابطاله في رواية : الارض القرمزية ، اذ يتحدث هذا البطل فيقول : لا يصل العم آنسلمو الى نهاية اي قصة ابداً لانه دائماً يتحرك نحو ارض جديدة .

يمكن ان نضفي على النصوص المنشأة بهذا النحو العشوائي سمة النظام المديد بان نطلع الاشخاص الذين يضيف احدهم كلمة في كل مرة على عنوان مسبق ومعتمد للنص .

اطلعني الدكتور دونالد . ا. دون من مختبر ستانفورد للالكترونيات على مثال لبناء نص بشكل عشوائي بحيث يضيف احد الأشخاص كلمة في كل مرة بعد اطلاعه على آخر كلمة موجودة في النص ، اضافة لمعرفته بعنوان النص : الرجال والنساء

وقد اتى النص على النحو التالي :

« احبت حواء بشدة عاطفية او غير كافي الليلة في اي مكان تموت فيه قبل البارحة مرة ثانية ومهما حبي أساء » .

اما من تجارب شركة بيل فنعرض النص التالي المنشأ وفق نفس القاعدة السابقة مع فارق إطلاع الشخص على الكلمات الثلاثة الاخيرة بدلاً من اطلاعه على الكلمة الأخيرة فقط . والنص هو :

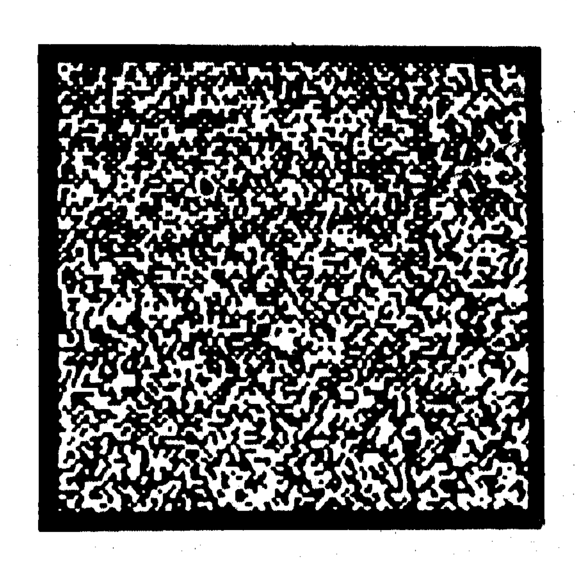
عن الحياة

« الحياة تملك عدة رجال حكماء وعقلاء نادراً ما يلومون البلهاء بشكل سطحي . قد تتعجب لماذا . المشاعر الإنسانية ولكن القبائل البدائية وجدت » .

لا شك ان قراءة هذه النصوص ستترافق بضحكات السخرية والتهكم ، اذ لا يمكن لإنسان عاقل ان ينشأ مثل هذه النصوص . ينتقي الشعراء قليلو الموهبة كلمات لا ارتباط بينها من اجل تحقيق القافية وهم لا ينتمون عادة أي بيت شعر جيد . ذكرنا ذلك لنؤكد أنه قد تكون للعملية العشوائية بعض الحظ في انشاء نصوص جيدة بالمقارنة مع هؤلاء الشعراء .

هل يتمكن الكومبيوتر من انتـاج نص واضح الميزات باستخدام احكام القواعد وسلاسل الاعداد العشوائية ؟ قد يستطيع إنشاء كلمات مضحكة بل ونصوص مضحكة تسـبب صدمة للقارىء . نستطيع أن نبحر بخيالنا ما شئنا فنتصور كومبيوتر قد جهز بكل عناصر القصة البوليسـية ، وانصرف الى تاليف قصة بوليسية بعد ذلك ، ما عساها تكون تلك القصة . على كل حال ليست هذه إلاّ تصورات وتخيلات .

يمكن توظيف الفنون البصرية لتوضيح نفس النقاط التي اتينا على ذكرها في حالة اللغة والموسيقى . وفعلاً فالتشكيل البصري العشوائي هو من وجهة النظر الرياضية الاكثر إدهاشا والاقل احتمالاً من كل التشكيلات البصرية تماما كالتشـكيل العشوائي المكون من الاحرف الابجدية او الموجات الصوتية : وللأسـف فالتشكيل العشوائي هو تشكيل باهت ، وتبدو التشكيلات المختلفة بالنسبة للعين الانسـانية متطابقة دون فروق واضحة بينها . اعرض في الشكل ١٣ ــ ٥ ١٠٠٠٠ بقعة بيضاء وسوداء موزعة بشكل عشوائي في محاولة لتاكيد هذه الفكرة .



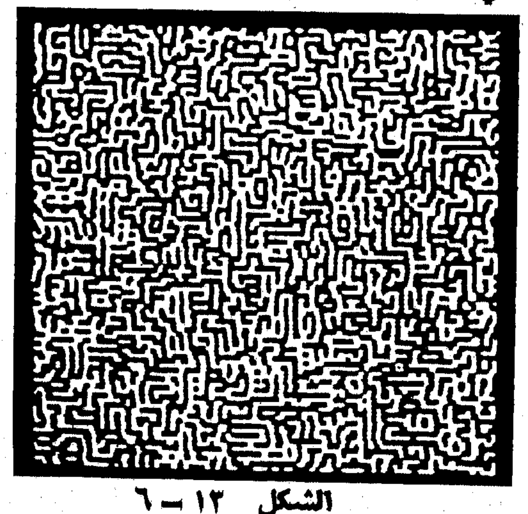
الشكل ١٣ ــ ٥

إن التشكيل الاخير في الشكل ١٣ ــ ٥ هو في واقع الأمـر من صنع الكومبيوتر لإنشاء هذا التشكيل ضمن دراساته للإدراك الجسم ومعنى الكومبيوتر ، اذ استطاع بيلا جولز العامـل في حقل الادراك أن يدفـع النماذج . ذهب جولسز أبعد من ذلك ببرمجة الكومبيوتر للتخلص من العشوائية في هذا النموذج ما امكن ، واشاد فكرته على جعل الكومبيوتر يتفحص وعلى التتابع مجموعات مكونة من اربعة نقاط متمركزة حول نقطة معينة .

اذا طابق المراكز في لونه (ابيض او اسود) احد زوجين من النقاط يجري ابدال لونه الى الاســود إذا كان ابيضا ، والى الأبيض اذا كان اسوداً . يحقق ذلك حذف الاقطار السوداء او البيضاء إلاّ عندما يكون احد الزوجين ابيضاً والآخر اسوداً او العكس .

إن اعتماد هذه الطريقة في اختزال العشوائية يفضي بنا الى الشكل ١٣ ــ ٦ حيث يبدو المظهر العام وقد تحســن فعلاً . حقاً إن عنصر العشوائية مطلوب لتامين التنوع والمفاجاة ، إلاّ ان النظام هو الوحيد الكفيل بإحداث البهجة .

يعود استخدام العشوائية والنظام في الفن الى عهود قديمة . يقدم المشكال تاثـيرات مبهرة باعطاء تشكيلات عشــوائية من قطع الزجاج تناظراً سداسي الأوجه .



الشكل ١٣ ــ ٦

حقق أحد الرسامين منذ عدة سنوات لوحة جديدة باسقاط عدد من الخيوط على قطع سوداء من الثياب وتثبيتها ومن ثم تأطيرها وفق وضعها العشوائي . كما حقق فنان سويسري باستخدام الكومبيوتر لوحات ملونة مزيج من النظام والعشوائية بيع الكثير منها بأثمان عالية .

زودني كل ذلك برؤية فلسفية اصفرية للفن والتي لن أعزوها الى نظرية المعلومات . وقد وصفت هذه الفلسفة بكونها أصفرية لأنها تهمل عن عمد الموهبة والعبقرية وهما العاملان الوحيدان اللذان يجعلان من الانتاج الفني قضية كبيرة .

يستلزم الفن الناجح تقدير الجمهور وموهبة الفنان . يتأثر الناس بعوامل كثيرة غير تلك التي تواجههم عند تأملهم العمل الفني . واذا حاول شخص ما مقاومة فعل العمل الفني ، فلن يحركه شيء وسيبقى بارداً على الدوام ، وعلى العكس اذا اقتادته رغبة المديح فسيمتدح حتى الاعمال الفنية المتوسطة . مثلاً أنا أحب شخصياً أعمال التراتيل الموسيقية التي ألفتها بالاشتراك مع زوجة شاتون . وفي كثير من الأحيان يفضل بعض المؤلفين اعمالهم الضعيفة . أيضا قد تذهب الجماعات الصغيرة والكبيرة على حد سواء الى تقدير الموضة القصيرة الأمد والتي لا تملك اي ميزات فعلية .

يجنح الجمهور من ضمن اشياء اخرى الى تحسس روح الخلق والابداع واكتشاف المعاناة الذاتية من خلال الأعمال الفنية . يجب على العمل الفني أن يملك اتساقاً بالغاً حد الكمال كي يجلب الاحترام لصاحبه ويعكس هويته الحقيقية .

نفرض أن فناناً ما استطاع انتاج كل الأعمال العظيمة التي نقبلها اليوم على انها من ابداع اسماء كبيرة ومتباينة الطابع من عالم الفن ، وذلك قبل ولادة كل هؤلاء الفنانين . طبعاً سيدهشنا ذلك ، إلا أن هذا الفنان لن ينتزع اعجابنا بسهولة ، ولن نقف منه موقف الاحترام الذي نقفه من كل عمل على حدة كونه يعكس هوية وذاتية محددتين . نستطيع

تمييز بيكاسو رغم انه غير مريح . لقد كان حاذقاً في طوابع متعددة ، لذا يصعب إصدار حكم متميز عليه . ما اسهل بالمقابل أن نقدر الفنان ماتيز .

يتوقف تقدير الجمهور للفن على كون الفن مفهوماً من قبل هذا الجمهور . مثلاً النكتة الصينية لن تضحك إلاّ عدد قليل من الأمريكيين، كما ان عشرة نكات صينية لن تكون مضحكة أكثر من إضحاك نكتة واحدة. إذا كان للفن ان يعطى حق قدره فيجب ان يصاغ الى درجة ما في نفس لغة الجمهور ، وإلاّ فمهما انطوى على التنوع ، لن يرى الجمهور فيه إلاّ الرتابة والتكرار . إن دهشتنا المتكررة لا يمكن أن تتحقق إلاّ بالمقارنة على خلفية الاعتياد وليس بالفوضى العشوائية .

يتبنى بعض الفنانين لغة تعلمها جمهورهم على أيدي أساتذة سابقين، وكان يوهان براهمز واحداً من هؤلاء ، بينما يذهب البعض الآخر الى تعليم جمهورهم لغة جديدة ، كما فعل الفنانون الانطباعيون . لا شك أن لغة الفن تتغير على الدوام ، ولكبار الفنانين علينا منة في هذا المجال اذ يعلموننا على الدوام لغات جديدة . لا يعني ذلك ان نتنكر لأصالة بعض الفنانين الكبار من أمثال باخ وهاندل ، الذين الفوا موسيقاهم بلغة الماضي .

اذا كانت اللغة ذات الكلمات الواضحة والعلاقات البينة ضرورية للفن فهي ليست كافية . إن التماثل الميكانيكي باهت ومخيب . وافضل شخصياً مفاجآت النثر العشوائي على الشعر المضجر لإوين ميريديث . ربما ستجد الانسانية في الفن العشوائي البديل المنشود لابتذال الفن الحرفي في عصر انهيار الفنون .

نكتفي بهذا القدر من نظرية المعلومات والفن .



الفصل الرابع عشر

عودة إلى نظرية الاتصالات

انه أمر مفرح بكل تأكيد ، أن تساهم فكرة جديدة بحل جملة كبيرة من المشاكل ، إلا أن الفكرة الجديدة لن تستأهل الوقفة عندها ما لم تبرهن أن لها قيمة عملية مهما كانت تلك القيمة محدودة .

انتقدني أحد الباحثين في نظرية المعلومات لأنني سبرت في هذا الكتاب إمكانية تطبيق نظرية المعلومات في مجالات اللغة ، علم النفس ، والفن ، فبالنسبة له تبدو العلاقة بين نظرية المعلومات وكل من فروع المعرفة هذه علاقة هامشية وضبابية . لماذا تنتزع القارىء من تطبيقات نظرية المعلومات المثبتة والأكثر أهمية لنجنح به نحو تطبيقات أخرى غير واضحة المعالم وقليلة الأهمية على الأقل في الوقت الحاضر ؟

يعود ذلك من جهة ، لرغبة عارمة دفعتني لشرح العلاقات الممكنة بين نظرية المعلومات في إطارها المحدد والضيق وفروع أخرى من المعرفة ظهرت علاقتها بهذه النظرية من خلال كتابات الآخرين . ومن جهة أخرى أعتقد أن نظرية المعلومات تساعدنا كي نتحدث بشكل معقول أو على الأقل في إبعادنا ما أمكن عن «الحديث غير المعقول» بصورة خاصة في مجال اللغويات والفن وعلم النفس . ومهما يكن من أمر فهناك خطر كبير من الانزلاق وراء التأكيد على هذه القضايا عبر كتاب يتحدث عن نظرية المعلومات .

Converted by Tiff Combine - (no stamps are applied by registered version)

تؤكد على الخطا الفاحش الذي نرتكبه اذا اعتقدنا ان اهمية نظرية المعلومات تنبع من ارتباطاتها العريضة مع فروع كثيرة كاللغة ، السيبرنيتيك ، علم النفس ، والفن . ان ترسيخ هذا الاعتقاد ما هو إلا تكرار لاغلاط ارتكبت بحق اكتشافات اخرى مهمة .

وهكذا فقد احيط عمل نيوتن في عصره بجدل فلسفي ومعرفي ، وارتبط لعدة سنوات تالية بشمولية مزعومة اساءت لطبيعته الحقيقية. إلا أن اينشتين استطاع ان يرى بوضوح اكثر عندما اكد بان العقل ضعيف ومحدود اذا ما قورن على خلفية مهمته اللانهائية ، ومضى بعد ذلك واصفاً عمل نيوتن بانه حقق الهدف المنشود المتمثل بولادة علم الميكانيك السماوي والذي تم تاكيده آلاف المرات من قبل نيوتن نفسه ومن تلاه .

وللعدالة نقول ان ميكانيك نيوتن كان فعالاً منذ ايام نيوتن وساهم في حل مشاكل لم يكن ليتخيلها نيوتن ومعاصروه ، إلا أن هذا الميكانيك لم يتمكن من حل كل مشاكل العلم ، كما تصور بعض الفلاسفة المتفائلين .

يبدو لي المضمون الهام الاكيد لنظرية المعلومات بسيطاً وواضحاً . فهي تنطوي على افكار السرع المعلوماتية او انتروبي المصادر المستقرة ، السعة المعلوماتية للاقنية ذات الضجيج وبدون الضجيج ، وكذلك الترميز الفعال للرسائل التي يولدها المصدر بحيث يتحقق البث الخالي من الاخطاء وبسرعة تساوي سعة القناة . اما عالم نظرية المعلومات فهو عالم انظمة الاتصالات الكهربائية المتضمن للأساليب الذكية في تصميم تلك الانظمة .

اجد من المناسب في ختام هذا الكتاب ان ابتعد عن الممكنات (او المستحيلات) المحتملة ذات الطابع العام وان اطرح عوضاً عن ذلك السؤال التالي : ماذا فعل باحثوا نظرية المعلومات وماذا يفعلون ابعد من هذا الكتاب ، بكلمات اوضح ، ماذا فعل هؤلاء الباحثون لتاهيل نظرية المعلومات كعلم متماسك صلب يمكن قبوله ابعد من وضعه الحالي كمجموعة نبوءات تدور حولها المناقشات .

نجد هنا مجالاً واسعاً من الابحاث يستلزم عرضها كتاباً آخر . لذا سيقتصر هذا الفصل على عرض موجز لأعمال نظريي المعلومات بعيد نشر شانون لبحثه الاول ، كما سيحاول تعريف القارىء بأهداف نظرية المعلومات في اطارها الضيق ، واخيراً سيحث القارىء على متابعة هذه النشاطات بتفصيل اكبر .

سعى باحثوا نظرية المعلومات الى تطبيق آخر لانتروبي السرعة المعلوماتية لمصدر رسائل غير ترميز وبث المعلومات . يرمي الرجال الطموحون الى اعطاء الصورة معنى اكبر ، أما الاكثر تواضعاً فيقنعون باي تطبيق صحيح ذي معنى .

كان التطبيق الوحيد في هذا السياق هو ذاك الذي قدمه ج. ل. كيلي الابن عام ١٩٥٦ . يتعلق هذا التطبيق بالمقامرة على احداث عشوائية حيث يملك المراهن معلومات داخلية عن خرج الحدث الذي سيراهن عليه . نستطيع أن نتخيل مثلاً أن احجار النرد قد قذفت للتو (أو أن السباق قد ابتدأ) وان المراهن المفضل يعلم ذلك وقد تلقى بعض المعلومات عن النتائج ، إلا ان الشخص الذي سيراهن معه لا يعرف ذلك ويعطي المراهن فرصاً عادلة على أساس احتمالات النتائج .

يتلقى المراهن معلوماته هذه على شكل واحدات متتالية من البيت أي جملة ردود من طراز نعم أو لا على مجموعة أسئلة مطروحة . يمكن مثلاً لمعطي المعلومات أن يخبر عما اذا استقرت قطعة النقد على الطرة أو النقش بإرسال بيت واحدة من المعلومات ، أو يمكن لهذا المعطي ان يخفض النتائج الممكنة لرمي حجر النرد من ٦ الى ٣ بارسال بيت واحدة من المعلومات تعلم المراهن عما اذا كان الوجه السطحي لحجر النرد زوجيا أو فرديا .

إن خير وسيلة لشرح عمل كيلي بعد هذه المقدمة هي سرد موجز هذا العمل : اذا كانت رموز الدخل لقناة اتصال تمثل إمكانات الخرج لحادثة عشوائية يجري الرهان عليها بشكل يتسق مع احتمالاتها ، فإن

بامكان المقامر الذي يستخدم المعرفة الموفرة له من خلال الرموز المستقبلة أن يزيد أرباحه بشكل أسي . تساوي السرعة الأسسية العظمى لتنامي ارباح المقامر سرعة بث المعلومات عبر القناة . يمكن تعميم هذه النتيجة لتضمين حالة الاحتمالات الاتفاقية .

وهكذا نصادف حالة تلعب فيها سرعة البث دوراً رئيسياً على الرغم من عدم التطرق لقضية الترميز ضمن الحالة المعتبرة . اما فيما مضى فلم يكن لهذه الكمية من أهمية إلا عبر نظرية لشانون أكدت انه باستخدام الترميز المناسب يمكن بث الأرقام الثنائية عبر القناة وفق السرعة المشار اليها وبأقل خطأ ممكن .

وفي لغة الاعداد يساوي عامل ازدياد ارباح المقامر :

$$\frac{\text{ند}}{٢}$$

حيث ن هو عدد مرات المراهنة ، ر هو العدد الوسطي لواحدات البيت من المعلومات التي تبث للمراهن في كل مراهنة .

اذا بدا هذا التطبيق تافهاً ، فعلى القارىء ان يتأمل حقيقة انه التفسير الرياضي الوحيد المكتشف الى جانب التطبيق المعلوماتي الذي قدمنا له فيما مضى من فصول .

يمكن أن يخطر على البال ، لدى تقديم نظرية المعلومات ، إمكانية أخرى لاستخدام نظرية المعلومات غير البحث عن تفسير مستحدث لسرعة البث . نشر شانون عام ١٩٤٩ بحثاً طويلاً بعنوان : « نظرية الاتصالات للأجهزة السرية » . إلا انه من المشكوك فيه أن يكون هذا البحث قد قدم مساهمة كبيرة لحل الشيفرات ، وان كان قد هيأ ولأول مرة نظرية متكاملة عن الوثائق السرية وتحليلها ويعتبر لذلك مادة غنية للمتخصص في هذا المجال .

ربما اننا لن نستطيع الخوض في تفاصيل هذا البحث ، إلا انني سأحاول اعطاء فكرة عن محتواه .

ماذا تكون عليه حالة محلل الوثائق السرية عندما يضع يده على رسالة جرى ترميزها بطريقة مجهولة ، انه يجهل امرين اثنين : الرسالة نفسها وطريقة ترميزها التي يمكن أن نطلق عليها اسم المفتاح .

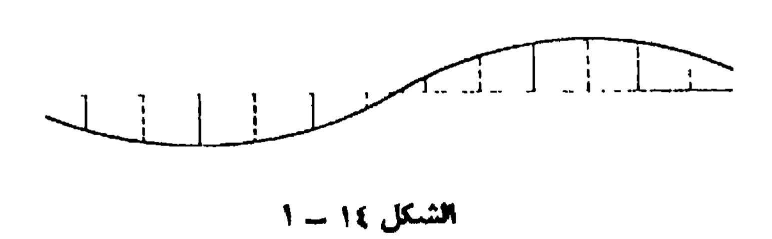
يحدث في بعض الأحيان أن يكون المحلل ملماً بالاساليب العامة للترميز . وكمثال بسيط يمكن ان يفترض المحلل أن الترميز جرى باستبدال كل حرف من الابجدية بحرف آخر وفق قواعد محددة .

يمكن أن تكون الرسالة المعروضة للمحلل طويلة او قصيرة ، واذا احتوت على ثلاثة احرف فقط مثلا : الت ، امكنة تفسيرها بكلمة : نهر ، او كلمة : قمر أو اي كلمة اخرى مؤلفة من ثلاثة احرف مختلفة . اذا كبرت الرسالة . فان عدد النصوص المكنة ينقص بالمقابل ، واذا كانت الرسالة كبيرة بما فيه الكفاية ، لا يبقى من تفسير لها الا نص واحد مقابل وحسب .

عبر شانون عن نقص الريبة هذا المتعلق بالنص الحقيقي الذي جرى ترميزه بشكل يقيم الرسالة المعنية على انها مجرد تغيير في الالتباس . تعطي الريبة $ت_{ص}$ (س) المعرفة في الفصل الثامن درجة الالتباس في النص الحقيقي الذي تم ترميزه بهدف الوصول الى الرسالة قيد البحث . استطاع شانون اجراء حسابات اثبت بموجبها أن هذه الريبة تتناقص بازدياد عدد الاحرف في الرسالة . وعندما تصبح هذه الريبة مساوية للصفر ، فانه لا يبقى الا امكانية واحدة للنص الذي جرى ترميزه ، ويصبح من حيث المبدأ حل الرسالة المعنية ممكناً .

ما هي انواع المشاكل التي واجهت او تواجه الآن نظريي المعلومات ؟ تتعلق بعض هذه المشاكل بمسالة اخذ العينات يستخدم نظريو المعلومات تكنيك اخذ العينات بهدف تمثيل اشارة مستمرة متغيرة ذات حزام تواترات محددة بواسطة سلسلة من الاعداد هي في الواقع سعات الاشارة ماخوذة كل ($\frac{1}{٢ س}$) ثانية ، حيث س هو عرض حزام الاشارة .

ان مجموعة العينات الممكنة الاشارة محدودة الحزام ليستوحيدة من نوعها ، اذ يمكن اخذ هذه العينات عند لحظات متفاوتة . وهكذا نوفق الشكل ١٤ ــ ١ يمكن ان تكون الخطوط الشاقولية المستمرة هي العينات المنشودة او الخطوط الشاقولية المتقطعة ، او اي خطوط اخرى ماخوذة عند نقاط اخرى . وفي الواقع ليس من الضروري أن تفصل العينات عن بعضها بفترات زمنية متساوية ، بشرط أن تؤخذ ٢ س عينة في كل ثانية .



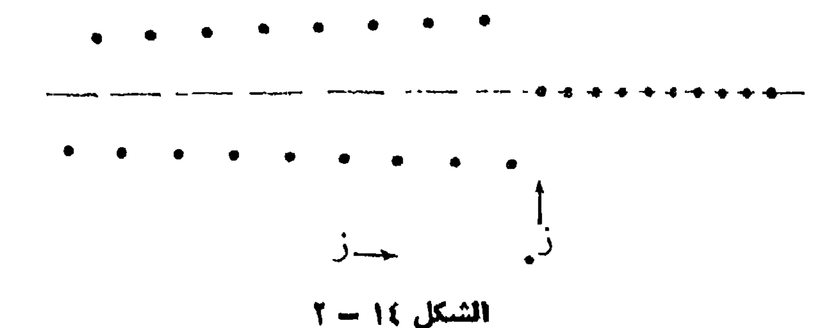
الشكل ١٤ ــ ١

ان شرط تمثيل الاشارة المحدودة الحزام بشكل وحيد باستخدام ٢ س عينة في كل ثانية هو استخدام كل العينات بدءاً من لحظة لا نهائية في الماضي وحتى لحظة لا نهائية في المستقبل الا أننا قد نحتاج في بعض الاحيان لاعتبار جزء من الاشارة محدودة الحزام ، او اشارة محدودة الحزام معدومة تقريباً باستثناء فترة محددة من الوقت ، ونرغب بتمثيل هذه الاشارة بدلالة العينات .

اول ما يخطر على البال هو السؤال المتعلق بتمثيل اشارة قصيرة او جزء من اشارة بسلسلة متناهية من العينات دون الاخذ بعين الاعتبار للتقنيات السابقة او اللاحقة . للاسف ان اعتبار عدد متناه من العينات لن يحدد اشارة وحيدة محدودة الحزام ، اذ يمكن ان تمر اشارات مختلفة محدودة الحزام عبر هذا العدد المتناهي من لعينات ، واذا كانت الاشارات ذات سمات كبيرة خارج نطاق العينات المعتبرة فان الاشارات ضمن هذا النطاق ستكون مختلفة بالتالي .

صحيح أن هذا قد يبدو فشلا ، ولكننا نستطيع تحديد عينات معينة متتالية ونصطلح على ان كل العينات السابقة والتالية لهذه المجموعة هي عينات صفرية بمعنى أن كلا منها تساوي الصفر ، اذ نستطيع أن نتصور ان الاشارة المعتبرة ضمن النطاق المحدد ستتفق مع العينات المعتبرة ، بينما ستكون اشارة صفرية تقريبا حيثما تكون العينات صفرية .

نفرض على سبيل المثال مجموعة من العينات تصبح صفرية بعد لحظة ز ، بينما تكون غير صفرية قبل هذه اللحظة ، كما في الشكل ١٤ ــ ٢ تمثل هذه العينات اشارة وحيدة محدودة الحزام ، ببساطة لانها مأخوذة عند كل الازمنة بدءاً من الماضي وحتى المستقبل . هل ستكون هذه الاشارة صفرية فعلا بعد اللحظة ز ؟



الشكل ١٤ ــ ٢

للاسف ، اثبت هـ . و . بولاك من مختبرات بيل ان هذه النتيجة ليست لازمة . نفرض اننا نتساءل عن الجزء من القدرة الكلية لهذه الاشارة الذي يحمله قسم الموجة الحادث بعد عشرة ثواني أو عشرين دقيقة او ربما بعد خمسين سنة من اللحظة ز ، نتذكر في هذا السياق أن كل العينات صفرية بعد اللحظة ز .

تتلخص الاجابة المدهشة لهذا التساؤل في أن نصف قدرة الاشارة تقريبا يمكن أن يحمل على القسم من الاشارة الحادث بعد أي لحظة زمنية تتسم بكونها فاصلة بين قيم العينات غير الصفرية قبلها ، وقيم

العينات الصفرية بعدها . وهكذا فقد تكون الاشارة صفرية عند كل لحظة بعد ز تؤخذ عندها أي عينة ، وفي نفس الوقت غير صفرية فيما بين هذه العينات .

لا تزال الجهود المبذولة لتمثيل الاشارات المحدودة الطول باستخدام العينات تتعثر عبر عوائق رياضية ، ويعمل الرياضيون ما يستطيعونه لشق الطريق بين هذه العقبات .

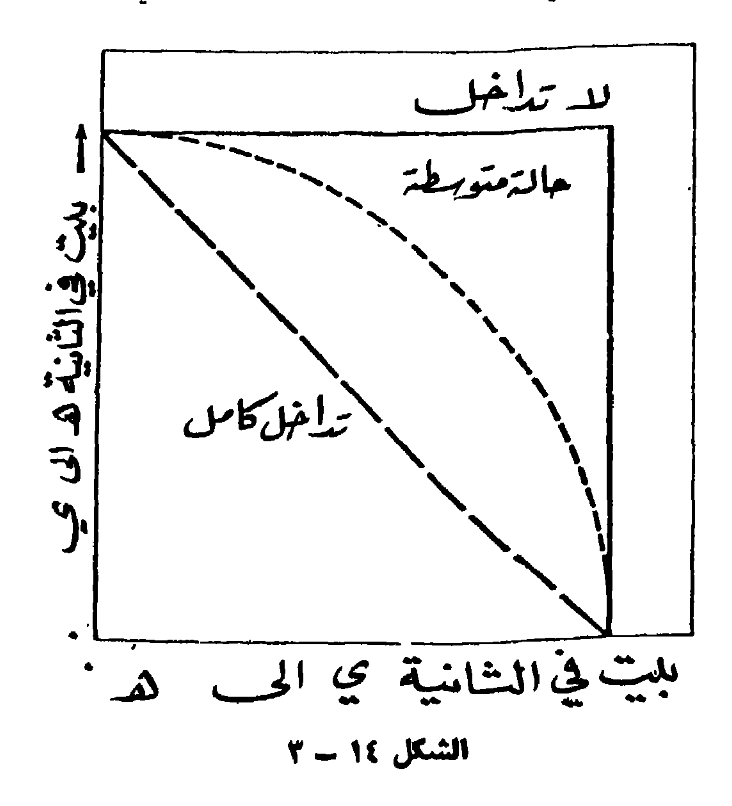
يشير عملا بولاك وسليبيان الى ان كلا طريقتي اخذ العينات والامواج الجيبية ليستا الطريقتين المناسبتين لتمثيل الاشارات المحدودة زمنيا ، وقد وظف هذان الرياضيان توابع رياضية اخرى لتحقيق التمثيل المطلوب دعيت بالتوابع الكروية المتطاولة .

يوضح المثال التالي جانبا محيرا من نظرية المعلومات . نفرض اننا نمثل في مبرقة النقطة بنبضة موجبة والخط بنبضة سالبة ، ونفرض أن احدا من محبي الدعابات عكس الوصلات الكهربائية بحيث يتم استقبال سالبة عندما يتم ارسال نبضة موجبة والعكس بالعكس . تؤكد نظرية المعلومات أن سرعة الارسال ستبقى نفسها في هذه الحالة لان هذا العمل لم يقدم أي ريبة اضافية . الا اننا سنشعر ان ضررا ما قد حل بنظام الاتصال ، وسيكون هذا الضرر اكبر اذا طبع جهاز الاستقبال حرفا مغايرا للحرف المرسل وانسحب ذلك على كل الاحرف .

اقض هذا المثال مضجع شانون طعمد الى صياغةنظرية تغطي الوضع الناشيء عنه ، اذ عرف من خلالها معيارا للامانة . وهكذا يفرض شانون عقوبة معينة على استبدال الحرف الصوتي بحرف ساكن وعقوبة اخف على استبدال الحرف الصوتي بحرف صوتي آخر . ثم يعمد الى تقييم الضرر الحادث للرسالة بسبب الاخطاء المتسقة أو الاخطاء العشوائية . اذا كان الضرر ناجما عن الاخطاء العشوائية لقناة ذات ضجيج ، يوضح شانون كيفية تصغيره الى حد أدنى ، كما يبين عدد واحدات البيت في كل ثانية اللازمة لبث الاشارة بدرجة معينة من الامانة .

انجز شانون ايضا عملاً ضخماً فيما يتعلق ببث الرسائل عبر الشبكات التي تتداخل فيها رسالة مع اخرى . ان ابسط انواع هذا التداخل هو حالة قناة وحيدة تبث عبرها رسالتان باتجاهين متعاكسين بين نقطتين منها هـ ، ي . نفرض بهدف التسهيل ان مواصفات عمل القناة هي نفسها في الاتجاهين هـ ي ، ي هـ .

نقوم برسم الخط البياني الممثل للعلاقة بين سعة القناة في الاتجاه هـ ي ، وسعة القناة في الاتجاه ي هـ ، وهو الخط المبين في الشكل ١٤ ــ ٣ نتخيل حالتين بسيطتين ، في الاولى لا يحدث تداخل بين الاشارة المنطلقة من هـ الى ي وبين الاشارة المنطلقة من ي الى هـ . يتكون الخط البياني الممثل لهذه الحالة من الجزء الافقي المستمر الممثل لسعة القناة من ي الى هـ والجزء الشاقولي المستمر لسعة القناة من هـ الى ي .



الشكل ١٤ ــ ٣

او نستطيع ان نتخيل ان ارسالنا عند لحظة معينة سيقتصر على احد الاتجاهين هـ الى ي ، او ي الى هـ . وهكذا اذا حافظنا على جهة الارسال هـي في ثلث الحالات ، فان الارسال في الاتجاه المعاكس ي هـ سيستغرق ثلثي الحالات الباقية ، وهكذا يجب ان يكون مجموع سعتي القناة في الاتجاهين هـي ، ي هـ ثابتا في هذه الحالة والنتيجة هي الخط المتقطع المائل بزاوية ٤٥ه في الشكل ١٤ ــ ٣ .

اما في الحالة المتوسطة حيث يكون هناك شيء من التداخل بين الارسالين في الاتجاهين نحصل على منحني كذاك المتقطع في الشكل ١٤ ــ ٣ .

لازالت مشكلة الترميز الفعال الموجه الرئيسي لاعمال الباحثين في نظرية المعلومات ، ففي قناة متقطعة يسعى هؤلاء لتصحيح عدد من الاخطاء في سلسلة من الارقام الثنائية المرسلة .

يركز هؤلاء الباحثون جهودهم ايضا للحصول على احسن ترميز معلوماتي عبر قناة مستمرة ذات ضجيج . نشر شانون عام ١٩٥٩ بحثا مطولا توصل فيه الى الحدين الاعلى والادنى لسرع انتشار الأخطاء لطرق ترميز مختلفة التعقيد وذلك في حالة قناة مستمرة ذات ضجيج غاوسي . تفضل الآن الرموز الملتفة ورموز فيتري ويسعى عباقرة الرياضيات الى رموز أجود وأرخص .

ولا يقتصر البحث عن طرائق جديدة للترميز على هؤلاء الباحثين ، بل يتعداهم الى المهندسين الساعين لتحسين الاتصالات الكهربائية والذين يجربون ترميز الاشارات التلفزيونية والصوتية باقل عدد ممكن من الارقام الثنائية ، وقد سبق ان تعرضنا لمحاولاتهم في الفصل السابع . تزداد اهمية الترميز الفعال خاصة لان الارسال الرقمي للاشارات (كما في تعديل ترميز النبضات) اخذ يحل تدريجيا محل الاتصالات التماثلية ، وستزداد تلك الاهمية اكثر واكثر عندما تعم طريقة الترميز بهدف الحفاظ على السرية والخصوصية اذ ان انجع الوسائل للحفاظ على السرية هي الوسائل الرقمية .

يسعى المهندسون ايضا لابتداع طرائق بسيطة و فعالة لتصحيح الاخطاء خاصة تلك التي تحدث أثناءارسال الاشارات الرقمية عبر الدارات الهاتفية يزداد استخدام اسلوب الارسال الرقمي في كل المجالات العسكرية والمدنية . تمتد خطوط الهاتف تقريبا في كل مكان ، وللمحافظة على سرعة بث جيدة للمعلومات تستخدم دارات صوتية . هنا يمكن اصلاح الاخطاء باكتشافها واعادة بثها ، الا أن استخدام الترميز لاصلاح الاخطاء هو أمر مفضل أيضا .

تفرض بعض الظروف الخاصة طرقا معينة للتعديل ، من هذهالظروف حالة الراديو المتحرك ، ففي المدن تصل الاشارات الى السيارات بعد ارتدادها عن مجموعة من الابنية وهكذا يتم استقبال نبضة قصيرة كمسحة من النبضات التي ارتحلت عبر مسافات مختلفة وفي مسارات متباينة . تحتاج هذه الحالة الى دراسة متانية لاكتشاف أحسن السبل في استخدام حزام من التواترات بالغ العرض بهدف تحسين البث .

تطرح الاتصالات العسكرية ، خاصة في مواجهة التشويش ، عددا من المشاكل الهامة .

قد يعتقد البعض ان كل هذا ليس الا ترفا هندسيا لا يقارن بالافاق الفلسفية التي تفتحها امامنا نظرية المعلومات . هل يمكن للفهم المستند الى الاعلام ، او للتقدير المحبب للطبيعة ، وكذلك للمزايا والفروق بين الرسامين الانطباعيين الفرنسيين أو الواقعيين الهولنديين ، من أن يكون ذي معنى كما في حالة المواجهة المفاجاة لفن جديد وغريب كالفن الياباني .

الا أن الناقد الفني الذي يتابع باخلاص كل التفاصيل لا شك سيحوز في النهاية بصيرة وقيما سليمة مثلما سيكون عليه حال هاوي الفنون المرهف الحس . يبدو ان هناك احكاما تثقيفية تفرض تقييم انتاج معين لما هو عليه وليس بسبب تأثيره على عقول الناس غير المسلمين به . اتمنى أن يكون لهذا الكتاب جوانبه المثيرة ، الا انني لا أبغي من ورائه تكوين وجهة نظر لدى القارىء عن نظرية المعلومات تختلف عن تلك التي يتمسك بها العاملون ذوو الخبرة في هذه النظرية ، اذ من الافضل ان انهي هذا الكتاب في أجواء متماسكة رزينة .


Converted by Tiff Combine - (no stamps are applied by registered version)

ملحق رياضي

يملك القارىء ملىء حريته في استخدام او عدم استخدام الرياضيات الواردة في هذا الكتاب بما في ذلك عدد من العلاقات الموزعة هنا وهناك ، ولربما اذا هو تعامل مع رياضيات هذا الكتاب ، لحكم عليه انه أولا واخيراً كتاب رياضي .

نعم انه كتاب رياضي ، فنظرية الاتصالات هي نظرية رياضية ، ولأن هذا الكتاب يعرض لهذه النظرية ، فهو ملزم لذلك بالرياضيات . يجب على القارىء في هذا السياق ان يميز بين الرياضيات وبين المصطلحات المستخدمة . اذ يمكن للكتاب ان ينطوي على كم كبير من الرياضيات من دون ان يحتوي على رمز واحد او اشارة مساواة .

لقد تطرق الهنود البابليون الى معالجات رياضية واسعة بما في ذلك اجزاء هامة من الجبر ، وذلك دون ان يستخدموا اكثر من الكلمات والجمل ، اذ ان المصطلحات الرياضية ولدت بعد ذلك . تهدف هذه المصطلحات الى تبسيط الرياضيات ، وهي تحقق هذا الغرض فعلا لمن يصبح ملماً بها . اما ما تفعله المصطلحات المذكورة فهو استبدال سلاسل طويلة من الكلمات المتواترة الاستعمال برموز بسيطة ، وتوفير اسماء بسيطة للكميات التي نتحدث عنها ، كذلك تهيء لصياغة دقيقة للعلاقات وعرضها من ثم بشكل بياني بحيث تدرك العين في نظرة واحدة ارتباطات الكميات ببعضها تلك الارتباطات التي لن تظهر وستضيع بين ثنايا الجمل الواصفة لها ، وستفوت فرصة كبيرة لادراك الصيغة الكلية لمجمل العلاقات دفعة واحدة .

وهكذا يقتصر دور المصطلحات الرياضية على تمثيل الرياضيات والتعبير عنها ، تماماً كما تمثل الاحرف الكلمات والعلامات الموسيقى . يمكن ان تمثل المصطلحات الرياضية ما لا معنى له او لا شيء تحديداً ، كما في حالة الأحرف او العلامات الموسيقية المرصوفة بشكل عشوائي . ينشأ بعض غريبي الأطوار احياناً نصوصاً مليئة بالمصطلحات الرياضية وهي لا تعني في واقع الامر اي نوع من الرياضيات .

حاولت في هذا الكتاب ان اضع كل الافكار الهامة في كلمات وجمل ، ولأن المصطلحات الرياضية تمنح فرصة أكبر للفهم المبسط للأشياء فقد عمدت في معظم الحالات الى اقحام هذه المصطلحات في صلب البحث . لقد شرحت ذلك عبر هذا الكتاب الى حد ما ، وسأعرض هنا وجيزاً لهذه الشروح . وكذلك سأجرؤ على طرح بعض القضايا البسيطة المرتبطة التي لم تستخدم في هذا الكتاب آملا ان يفيد منها القارىء في مجالات اخـرى .

اول ما يواجهنا في المصطلحات الرياضية هو استخدام الاحرف لتمثيل الاعـداد واشياء اخـرى ايضاً ، ففي الفصل الخامس مثلا استخدمنا الرمز ب م للدلالة على زمرة او سلسلة من الرموز او الاحرف، ربما زمرة من الاحرف ، بينما وظف الرمز م لتمييز اي الزمر نعني . يمكن مثلا في حال كون الرمز م مساوياً الواحد ان تكون الزمرة $ب_{١}$ بالمقابل هي آ آ آ ، بينما لقيمة اخرى مثل ١٢١ ، قد تكون الزمرة كَ ي د .

نستخدم في حياتنا العمليات الأربعة المعتادة : الطرح ، الضرب ، التقسيم ، والجمع بشكل متواتر . نستخدم احياناً الاحرف للدلالة على الأرقام الواردة في هذه العمليات : مثلا :

الجمـع : ٢ + ٣
آ + د

نقرأ العملية الثانية على الشكل : آ زائد د ، ونفسرها على انهـا حاصل جمع عددين يمثل احدهما آ ويمثل الآخر د .

الطـرح : ٥ ـ ٤
ك ـ ر

بالمثل نقرأ العملية الثانية ك ناقص ر .

الضرب : ٣ × ٥ او ٣ . ٥ او (٣) (٥)
س × ع او س . ع او (س) (ع)

اذا لم نستخدم الاقواس في التمثيل الاخير لقرأنا الجداء ٣ × ٥ على انه العدد ٣٥ . نستطيع استخدام الأقواس للدلالة على جداء اي كميات نرغب بضربها ، مثلا يمكننا كتابة س ع على الشكل (س) (ع) ، الا أننا لا نحتاج ذلك في معظم الحالات . نقرأ (٣) (٥) على الشكل ٣ ضرب ٥ ، بينما نقرأ س ع كحرفين متتالين : س ع بدلا من قراءتهما على الشكل س ضرب ع .

التقسيم : ٦ ÷ ٣ او $\frac{٦}{٣}$ او ٦ / ٣
$\frac{١}{ص}$ او ١ / ص

نقـرا عـادة $\frac{١}{ص}$ وفق العبـارة ١ على ص وليس ١ تقسيم ص .
تعامل الكميات المتضمنة في اقواس كعدد واحد ، مثلا :

$$\frac{(٢+٤)}{٣} = \frac{٦}{٣} = ٢$$

(٤ + ٨) (٢) = (١٢) (٢) = ٢٤
(آ + ب) حـ = آ حـ + ب حـ

نقرأ (آ + ب) على الشكل آ زائد ب ، أو على الشكل : الكمية آ زائد ب ، اذا ادى الشكل الأول لبعض التشويش . وهكذا اذا قلنا حـ ضرب آ زائد ب لكان المعنى الممكن : حـ آ + ب على الرغم من اننا نقرأ العبارة الأخيرة وفق ما يلي : حـ آ زائد ب . اما اذا قلنا حـ ضرب الكمية آ زائد ب لكان واضحاً أننا نعني : حـ (آ + ب) .

استخدم مفهوم الاحتمال في هذا الكتاب بشكل متواتر . يمكن ان نقول مثلا أن احتمال الرمز ذي الترتيب م في سلسلة من الرموز هو حَ (م) . نقرأ ذلك وفق العبارة : ح لـ م .

يمكن أن تكون الرموز كلمات ، اعداد ، او احرف ويمكن أن نتصور جدولة الرموز حيث تشير اعداد مختلفة للقيم الممكنة للرمز م مثلا وما يقابل هذه القيم من احرف . يوضح الجدول التالي هذه الفكرة :

قيمة م	الحرف المقابل
١	آ
٢	ب
٣	ت
٤	ث
٥	ج
٦	ح
.	.
.	.
.	.
الخ	الخ

عندما نود الاشارة الى احتمال حرف معين ، ج مثلا ، نستخدم المصطلح ح (٥) لأن العدد ٥ يحدد الحرف ج في الجدول ، الا اننا نكتب عوضاً عن ذلك وبهدف التبسيط ح (ج) .

ما هو هذا الاحتمال ، انه نسبة عدد مرات ورود الحرف المعني الى عدد الاحرف الكلي في مقطع معين . وهكذا اذا ورد الحرف ي ١٣٠٠٠٠ مرة في نص يحتوي على ١٠٠٠٠٠٠ حرف كان ح (ي) مساوياً لـ :

$$\text{ح (ي)} = \frac{١٣٠٠٠٠}{١٠٠٠٠٠٠} = \text{١٣ر٠} = \text{١٣ ٪}$$

نتحدث أحياناً عن احتمال وقوع حادثين معاً ، إما في وقت واحد ، أو على التتابع . نستخدم مثلا الحرف س للدلالة على الاشارة المرسلة والحرف ص للدلالة على الاشارة المستقبلة ، ويكون المصطلح ح (س،ص) دالا في هذه الحالة على ارسال س واستقبال ص . نقرأ هذا المصطلح وفق العبارة : احتمال س ص حيث نعبر عن الفاصلة بوقفة قصيرة يمكن مثلا أن نرسل على وجه التخصيص الحرف و ونستقبل الحرف ب ، ويكون احتمال هذا الحادث ح (و ، ب) ، اما الامثلة الأخرى عن ح (س ، ص) فكثيرة منها : ح (آ ، آ) ، ح (ك ، د) ...... الخ حيث ان كل هـذه الأمثلة تنتج عن تعويضات مناسبة في المصطلح ح (س ، ص) .

نتعامل أيضاً مع الاحتمالات الشرطية . مثلا إذا ارسلنا س ، ما هو احتمال ان نستقبل ص ، نصطلح على كتابة هذا الاحتمال الشرطي بالرمز $\text{ح}_{\text{س}}$ (ص) ونقرأه وفق العبارة ح لـ ص بدلالة س . يستخدم بعض المؤلفين المصطلح ح (ص ا س) للدلالة على الاحتمال الشرطي والذي يقرأ على الشكل : احتمال ص لدى توفر س . استخدمت شخصياً المصطلحات التي تبناها شانون في بحثه الاصلي عن نظرية الاتصالات .

نكتب الآن علاقة رياضية بسيطة ثم نحاول تفسيرها :

$$\text{ح (س ، ص)} = \text{ح (س)} \times \text{ح}_{\text{س}}\text{ (ص)}$$

اي ان احتمال مواجهة س ، ص سوية تساوي احتمال مواجهة س لوحدها مضروبا في احتمال مواجهة ص عندما نكون قد واجهنا س للتو يمكن ان نصيغ هذا التفسير بشكل آخر فنقول إن عـدد مرات الورود المشترك للرمزين س ، ص يساوي عدد مرات ورود الرمز س مضروباً بنسبة ورود الحرف ص بالمقارنة مع الأحرف الأخرى .

نحتاج في كثير من الاحيان لجمع عدد من الاشياء مع بعضها ، فمثل هذه العملية بالرمز Σ وهو مقلوب الحرف اليوناني سيكما . نفرض ان الرمز ص يمثل عدد صحيح ، اي ان ص يمكن ان يكون ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ...... الخ ونفرض اننا نود ترميز المجموع :

٠ + ١ + ٢ + ٣ + ٤ + ٥ + ٦ + ٧ + ٨

الذي يساوي بالطبع ٣٦ . نكتب هذا المجموع على الشكل :

$$\sum_{\text{ص} = ٠}^{\text{ص} = ٨} \text{ص}$$

ونقرؤه : مجموع ص من ص تساوي صفر والى ص تساوي ٨ . هنا يعني الرمز Σ مجموع ، بينما المساواتان ص = ٠ ، ص = ٨ تعنيـان من ص = ٠ الى ص = ٨ . وأخيراً يعنـي ورود ص على اليسـار أن ما نجمعه هو الأعداد الصحيحة ذاتها .

يمكن أن تكون هناك كميات مختلفـة يلعب ص بالنسبة إليهـا دور الدليل . مثلا احتمالات الأحرف وفق الجدول التالي :

قيمة ص	الحرف المقابل	احتمال الحرف ح (ص)
١	ا	٠ر١٣١٠٥
٢	ب	٠ر١٠٤٦٨
٣	ت	٠ر٠٨١٥١
٤	ث	٠ر٠٧٩٩٥
٥	ج	٠ر٠٧٠٩٨
٦	ح	٠ر٠٦٨٨٢
٧	خ	٠ر٠٦٣٤٥
٨	د	٠ر٠٦١٠١
٩	ذ	٠ر٠٥٢٥٩
١٠	ر	٠ر٠٣٧٨٨
١١	ز	٠ر٠٣٣٨٩
١٢	س	٠ر٠٢٩٢٤
١٣	ش	٠ر٠٢٧٥٨
١٤	ص	٠ر٠٢٥٣٦
١٥	ض	٠ر٠٢٤٥٩
١٦	ط	٠ر٠١٩٩٤
١٧	ظ	٠ر٠١٩٨٢
١٨	ع	٠ر٠١٩٨٢
١٩	غ	٠ر٠١٥٣٩
٢٠	ف	٠ر٠١٤٤٠
٢١	ق	٠ر٠٠٩١٩
٢٢	ك	٠ر٠٠٤٢٠
٢٣	ل	٠ر٠٠١٦٦
٢٤	م	٠ر٠٠١٣٢
٢٥	ن	٠ر٠٠١٢١
٢٦	هـ	٠ر٠٠٠٧٧
٢٧	و	٠ر٠٠٠٣٠
٢٨	ي	٠ر٠٠٠١٠

إذا اردنا جمع هذه الاحتمالات لكتبنا :

$$\sum_{\text{ص}=\text{١}}^{\text{٢٨}} \text{ح}\,(\text{ص})$$

ونقرأ هذا المجموع : مجموع ح (ص) من ص تســاوي ١ الى ٢٨ تساوي هــذه الكمية الى الواحــد تقريباً . إن نسـبة عــدد مرات ورود الحرف ا في كل حرف مضافة الى النسبة المقابلة في حالة ب وهكذا لكل الأحرف يصل بنا الى نسبة ورود اي حرف في الحرف اي ا .

إذا كتبنـــا :

$$\sum_{\text{ص}} \text{ح}\,(\text{ص})$$

فنعني المجموع لكل قيم ص ، اي كل ما يمثل اي شــيء . ونقرؤه : مجموع ح (ص) عبر ص . اذا كان ص حرفاً أبجدياً فسننفذ عملية الجمع الـ ٢٨ احتمالا مختلف .

نتعامل أحياناً مع تعابير تتضمن حرفين مثل س ، ص ونرغب بإجراء عملية الجمع بالنسبة لأحد هذين الدليلين . يمكن أن يكون الرمز ح (س ، ص) هو احتمال ورود الحرف س متبوعاً بالحرف ص ، في حالة زوج الأحرف ر د مثلا . يكون هذا الاحتمال : ح (ر ، د) ، ونكتب بشكل مشـــابه :

$$\sum_{\text{ص}} \text{ح}\,(\text{س}\,،\,\text{ص})$$

ونقرأ هذا المجموع : مجموع ح د س ، ص عبر ص ، يعني ذلك اعتبار كل قيم ص الممكنة واجراء المجموع عبرها .

$$\sum_{\text{ص}} \text{ح}\,(\text{س}\,،\,\text{ص}) = \text{ح}\,(\text{س})$$

ونقرا هذه العلاقة : مجموع ح دِ س ، ص عبر ص يساوي ح دِ س.
بشكل اوضح : اذا جمعنا احتمالات ورود كل حرف بعد حرف معين نحصل ببساطة على احتمال ورود هذا الحرف ، لان ورود الحرف المعني سيترافق بورود حرف تالٍ له .

نحتاج لتمثيل عدد مضروب في نفسه مرات متتالية ، اضافة لاستخدامنا الجمع والطرح والضرب والتقسيم . فمثل هذه العملية بالرمز :

$$٢^{١} = ٢$$

اي ان العدد المضروب بنفسه هو ٢ ، بينما عدد مرات ضربه بنفسه في هذا المثال الخاص هو مرة واحدة .

$$٢^{٢} = ٤$$

اي ٢ مرفوعة للقوة ٢ ، وهو مربع الـ ٢ .

$$٢^{٣} = ٨$$

اي ٢ مرفوعة للقوة ٣ ، وهو مكعب الـ ٢ ، اي ٢ مضروبة بنفسها ثلاثة مرات .

سمي في هذه الامثلة ٢ بالاساس ، بينما ١ ، ٢ ، ٣ كل منها قوة او اس .

وبشكل عام اذا كتبنا $٢^{ن}$ فنعني ٢ مضروبة بنفسها ن مرة .

يجب ان نضيف الى ذلك ، بهدف الابقاء على الاتساق في الرياضيات التعريف التالي :

$$٢^{٠} = ١$$

اي اننا اذا رفعنا اي عدد للقوة ٠ كان الناتج واحد على الدوام بصرف النظر عن هذا العدد .

تستخدم الرياضيات ايضا الاس الكسري او السالب :

$$أ^{-ن} = \frac{١}{أ^{ن}} = (١/أ)^{ن}$$

$$أ^{\frac{١}{ن}} = \sqrt[ن]{أ}$$

من خصائص القوى :

$$أ^{ن} \times أ^{م} = أ^{ن + م}$$

وكامثلة على ذلك نكتب :

$$٤^{٣} \times ٤^{٧} = ٤^{١١}$$

$$٤^{\frac{١}{٢}} = \sqrt[٢]{} =$$

$$\sqrt[٣]{٨} = ٨^{\frac{١}{٣}} = ٢$$

اما التابع الرياضي الهام الذي استخدمناه في هـذا الكتاب فهـو اللوغاريتم . يمكن للوغاريتم ان يتخذ اي اسـاس ، الا ان الاساس الذي استخدمناه في هذا الكتاب هو ٢ . اذ اعطينا عدداً ما ، يعرف لوغاريتم هذا العدد من الاسـاس ٢ على انه القوة او الاس التي اذا رفعنا اليهـا العدد ٢ كان الناتج هـو العدد المعطى لنا ونشير الى هـذا اللوغاريتم بالمصطلح لع س حيث س هو العدد المعطى لنا . وهكذا يكون لدينا وفق هذا التعريف :

$$٢^{\text{لع س}} = \text{س}$$

مثلاً :

$$\text{لع } ٨ = ٣ \qquad ٢^{٣} = ٢^{\text{لع } ٨} = ٨$$

ندرج هنا بعض اللوغاريتمات من الاساس ٢ :

العدد س	لوغاريتمه لع س
١	٠
٢	١
٤	٢
٨	٣
١٦	٤
٣٢	٥
٦٤	٦

نوجز بعض خواص اللوغاريتم فيما يلي :

$$\text{لع } (\text{آ} \times \text{ب}) = \text{لع آ} + \text{لع ب}$$

$$\text{لع } \frac{\text{آ}}{\text{ب}} = \text{لع آ} - \text{لع ب}$$

$$\text{لع } \text{حـ}^{\text{ن}} = \text{ن} \times \text{لع حـ}$$

لا تستخدم اللوغاريتمات من الاساس ٢ الا في نظرية المعلومات ، بينما تستخدم اللوغاريتمات من الاساس ١٠ أو الاساس e بشكل اكبر في فروع اخرى من العلم ، علماً بأن العدد e هو العدد الطبيعي النابييري :

$e = ٢٫٧١٨$.

اذا طورنا مصطلحاتنا ، فرمزنا للوغاريتم س من الاساس ٢ بالرمز $\text{لع}_{٢}\,\text{س}$ ، ومن الاساس عشرة بالرمز $\text{لع}_{١٠}\,\text{س}$ ، ومن الاساس e بالرمز $\text{لع}_{e}\,\text{س}$ ، لحصلنا على العلاقات التالية :

$$\text{لع}_{٢}\,\text{س} = \text{لع}_{٢}\,١٠ \times \text{لع}_{١٠}\,\text{س} = \frac{\text{لع}_{١٠}\,\text{س}}{\text{لع}_{١٠}\,٢}$$

$$\text{لع}_{٢}\,\text{س} = ٣٫٣٢ \times \text{لع}_{١٠}\,\text{س}$$

$$\text{لع}_{٢}\,\text{س} = \text{لع}_{٢}\,e \times \text{لع}\,\text{س} = \frac{\text{لع}\,\text{س}}{\text{لع}_{e}\,\text{س}}$$

$$\text{لع}_{٢}\,\text{س} = ١٫٤٤ \times \text{لع}_{e}\,\text{س}$$

تدعى اللوغاريتمات من الاساس e باللوغاريتمات الطبيعية ولها بعض الخصائص الرياضية البسيطة والهامة . مثلاً اذا كان س اقل بكثير من الواحد تتحقق العلاقة :

$$\text{لع}_{e}\,(١ + \text{س}) = \text{س}$$

لقد استخدمنا هذا التقريب في الفصل الخامس .

يشير اخيراً الى ان ورود المصطلح لع س في هذا الكتاب ، عنى في الواقع $\text{لع}_{٢}\,\text{س}$.

المؤلف في سطور

ولد الدكتور جون . ر. بيرس في ديس موينس بولاية آيوا في أميركا عام ١٩١٠ وترعرع في الغرب الاوسط الاميركي . تلقى علومه الجامعية في معهد كاليفورنيا التكنولوجي حتى حصوله على درجة الدكتوراه في الهندسة الكهربائيـــة .

التحق عام ١٩٣٦ بشركة بيل للهاتف وشغل فيها عدة مناصب حتى عام ١٩٧١ حيث تركها وعاد الى معهد كاليفورنيا التكنولوجي حيث يعمل الآن في منصب التكنولوجي الاول في مختبر الدفع النفاث .

ظهرت مؤلفات الدكتور بيرس في مجلة العلم الاميركي ومجلة الاطلسي الشهرية ومجلة كورونيت ومجلات خيال علمي اخرى . اما كتبه الاخرى فهي : عالم الانســان الصوتي ، أمواج الالكترون ورسائله ، الامــواج والأذن ، انابيب الامواج المتحركة ، نظرية وتصميم الاشعة الالكترونية ، كل شيء عن الامواج ، واخيرا مقدمة الى علم وانظمة لاتصالات .

ينتمي الدكتور بيرس لعضوية عدة جمعيات علمية منها : الاكاديمية الوطنية للعلوم ، الاكاديمية الوطنية للهندســة ، الاكاديمية الاميركية للفنون والعلوم ، الاكاديمية السويدية الملكية للعلوم ، نقابة المهندســين الالكترونيين والكهربائيين ، جمعية الفيزياء الامريكية ، وجمعيةالصوتيات الاميركية .

نال الدكتور بيرس عشر درجات تقديرية وعدد من الجوائز منها : المدالية الوطنية للعلوم ، ميدالية اديسون ، وميدالية الشرف ، جائزة مؤسسي الاكاديمية الوطنية للهندسة ، ميدالية سيغرن (من السويد) وميدالية فالدمار باولسون (من الدنمارك) .



الفهـــرس







الاعلام ، المعلومات ، الاعلاميات ، الاتصال والتواصل ، تزايد العلائق البشرية المستمر ، تعقدها ، اتساع دائرتها ... ان تحفظ أكبر عدد ممكن من المعلومات في جهاز صغير بمتناول يدك تطلب منه أن يعيد لك بعضا منها ، او كلها ، متى شئت وكيف شئت تلك حقائق نهاية القرن الحالي والقرن الذي يلي ، وحاجة انسان اليوم والغد وهوسه. والعلم ، اي علم ، وليد حاجة صارت ملحة فالعقل يسعى الى تلبيتها .

لهذا كانت السيبرنيتيكا التي أصدرت الوزارة عنها كتابا هو في الواقع مقدمة لكتابنا هذا ، وعن السيبرنيتيكا نشأت الاعلاميات ونظرية المعلومات ، فما هي هذه النظرية التي بها وبها وحدها تكاد تتميز معرفيا المرحلة التاريخية الراهنة عن غيرها .

هذا الكتاب هو محاولة لوضع النظرية هذه في متناول انسان المستقبل . لن يجد القارىء كتابنا هذا سهلا ولكن ثمة حقيقة عليه أن يعرفها مسبقا وهي أن الذين يجيدون الاعلاميات هم الذين يتصرفون بمصائر الشعوب . أو تظن ايها القارىء العزيز أن من السهل على الانسان فردا وجماعات أن يدخل القرن الواحد والعشرين وهو محتفظ بشخصيته القومية والحضارية الموروثة هي كما هي ! ...

ان نظرية المعلومات هي التي سترسم للانسان خطا سيره في المستقبل المنظور ، وربما الغير منظور .

الطبع وفرز الألوان في مطابع وزارة الثقافة

دمشق ١٩٩١

سعر النسخة داخل القطر
١٠٠ ل.س

في الاقطار العربية مايعادل
٢٠٠ ل.س